

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра комп'ютерної інженерії

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ
Завідувачка кафедри,
д-р техн. наук, проф.
_____ Ірина ЖУРАВСЬКА
« __ » _____ 202__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА
Безпілотний літальний апарат для виконання
гуманітарних місій з використанням аналогового
каналу передачі даних

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія»

Здобувач

_____ Павло ЧЕРЕДНІЧЕНКО
підпис

« __ » _____ 202__ р.

Керівник д-р фіз-мат. наук, професор

_____ Геннадій ЧУЙКО
підпис

« __ » _____ 202__ р.

Миколаїв – 2025

Факультет	Комп'ютерних наук
Кафедра	Комп'ютерної інженерії
Рівень вищої освіти	Другий (магістерський)
Освітній ступень	Магістр
Спеціальність	123 Комп'ютерна інженерія
Освітня програма	Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри комп'ютерної інженерії
_____ Ірина ЖУРАВСЬКА
« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну роботу здобувача

Чередніченко Павло Русланович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Безпілотний літальний апарат для виконання гуманітарних місій з використанням аналогового каналу передачі даних

Затверджена наказом по ЧНУ ім. Петра Могили від 23.06.2025 № 165/1

2. Строк представлення кваліфікаційної роботи « 10 » грудня 2025 р.

3. Очікуваний результат роботи та початкові дані, якщо такі потрібні

Очікуваним результатом магістерської роботи є розробка повністю функціональної, модульної та аналогової FPV-платформи, що відповідає вимогам гуманітарних місій. Це включає успішне завершення апаратної збірки. В програмному відношенні очікується повна верифікація конфігурації Betaflight. Функціональні вимоги передбачають, що БПЛА повинен забезпечувати пропорційне керування нахилом FPV-камери та дискретне керування механізмом скиду вантажу. Початкові дані для інженерних розрахунків базуються на обладнанні, програмному забезпеченні та налаштуванні VTX на канал, який оптимізований для КСХ антени.

4. Перелік питань, що підлягають розробці:

1) Розробка та верифікація програмної моделі керування сервоприводами в Betaflight для реалізації функціоналу корисного навантаження;

- 2) Проектування модульної 3D-друкованого поворотного механізму кріплення камери БПЛА;
- 3) Обґрунтування та реалізація низькозатримкового комунікаційного комплексу, оптимізованого для далеkobійних гуманітарних місій;
- 4) Розробка конструкції механізму скиду дискового типу, що забезпечує надійне утримання та чітке звільнення вантажу масою до 1 кг;
- 5) Верифікація функціоналу CAMSTAB для підвищення точності польоту під час доставки вантажу;

5. Перелік графічних матеріалів

Схема підключення пристрою

3D-моделі

Фотографії виробу

6. Консультанти:

Консультант	Кафедра (організація)	Частина роботи

Керівник роботи

Особистий підпис

Геннадій ЧУЙКО

Власне ім'я ПРИЗВИЩЕ

Здобувач

Особистий підпис

Павло ЧЕРЕДНІЧЕНКО

Власне ім'я ПРИЗВИЩЕ

Дата видачі завдання « _____ » _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання кваліфікаційної магістерської роботи

Тема: Безпілотний літальний апарат для виконання гуманітарних місій з використанням аналогового каналу передачі даних

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1	Розробка та затвердження завдання на виконання КМР	01.10.2025	10.10.2025	Виконано
2	Огляд літератури за темою роботи	15.10.2025	18.10.2025	Виконано
3	Складання календарного плану КМР	19.10.2025	06.11.2025	Виконано
4	Аналіз предметної області	19.10.2025	04.11.2025	Виконано
5	Розробка проектних рішень	23.10.2025	20.11.2025	Виконано
6	Моделювання та конструювання АПЗ	20.10.2025	19.11.2025	Виконано
7	Перевірка працездатності, тестування та апробація розробленого АПЗ, аналіз результатів тестування	20.11.2025	23.11.2025	Виконано
8	Оформлення КМР та презентації	15.11.2025	04.12.2025	Виконано
9	Попередній захист	25.11.2025	25.11.2025	Виконано
10	Відгук керівника КМР	04.12.2025	07.12.2025	Виконано
11	Рецензування	05.12.2025	08.12.2025	Виконано
12	Завершення оформлення КМР та презентації	07.12.2025	07.12.2025	Виконано
13	Захист кваліфікаційної магістерської роботи	16.12.2025	17.12.2025	Виконано

Керівник роботи

Особистий підпис

Геннадій ЧУЙКО

Власне ім'я ПРИЗВИЩЕ

Здобувач

Особистий підпис

Павло ЧЕРЕДНІЧЕНКО

Власне ім'я ПРИЗВИЩЕ

« _____ » _____ 20__ р.

АНОТАЦІЯ

до кваліфікаційної магістерської роботи
«Безпілотний літальний апарат для виконання гуманітарних місій з
використанням аналогового каналу передачі даних»
Студент 605 гр.: Чередніченко Павло Русланович
Керівник: д-р фіз-мат. наук, професор Чуйко Г. П.

Кваліфікаційна магістерська робота присвячена розробці аналогового безпілотного літального апарату (БПЛА), спеціалізованого для виконання оперативних гуманітарних місій. Актуальність теми зумовлена гострою потребою у швидких, надійних та бюджетних засобах доставки критично важливих малогабаритних вантажів у важкодоступні або небезпечні райони, де традиційні методи логістики є неефективними або заблокованими.

Основна мета роботи – проектування, конфігурація та тестування функціоналу, що розширює базові можливості FPV-дрона. Наукова новизна полягає у розробці та програмній конфігурації унікальних моделей керування сервоприводами. Перша модель забезпечує регульований нахил FPV-камери. Друга модель реалізує механізм точного скиду гуманітарного вантажу.

У процесі виконання роботи проведено:

1) порівняння мультироторних та літальних апаратів. Огляд комерційних та FPV-платформ для логістики. Огляд технічних рішень для систем керування та навігації. Аналіз існуючих механізмів доставки вантажів та керування корисним навантаженням;

2) вибір та обґрунтування компонентної бази 10-дюймового БПЛА. Розробка електричної схеми та інтеграція електроніки. Схеми підключення польотного стека. Розробка 3D-моделей;

3) конфігурація польотного контролера. Налаштування RC-керування та режимів польоту. Конфігурація UART та виходів PWM та конфігурація каналу AUX для керування механізмами;

4) тестування працездатності RC-системи, сервоприводів та телеметрії.

Ключові слова:

БПЛА, FPV-дрон, гуманітарна місія, Betaflight, сервокерування, скид вантажу, 3D-моделювання.

ABSTRACT

of the Master's Thesis

« Unmanned aerial vehicle for humanitarian missions using an analog data transmission channel»

Student: Pavlo Chednichenko

Supervisor: D.Sc. (Phys.-Math.), Prof. Gennady Chuyko

This master's thesis is devoted to the development of an analog unmanned aerial vehicle (UAV) specialized for performing operational humanitarian missions. The relevance of the topic is due to the urgent need for fast, reliable, and affordable means of delivering critical small cargo to hard-to-reach or dangerous areas where traditional logistics methods are ineffective or blocked.

The main goal of the work is to design, configure, and test functionality that expands the basic capabilities of the FPV drone. The scientific novelty lies in the development and software configuration of unique servo control models. The first model provides adjustable tilt of the FPV camera. The second model implements a mechanism for the precise delivery of humanitarian cargo.

In the course of the work, the following was carried out:

1) comparison of multicopter and flying vehicles. Review of commercial and FPV platforms for logistics. Review of technical solutions for control and navigation systems. Analysis of existing cargo delivery and payload control mechanisms;

2) selection and justification of the component base of a 10-inch UAV. Development of an electrical diagram and integration of electronics. Flight stack connection diagram. Development of 3D models;

3) flight controller configuration. RC control and flight mode settings. Configuration of UART and PWM outputs and configuration of the AUX channel for controlling mechanisms;

4) testing the performance of the RC system, servo drives, and telemetry.

Keywords:

UAV, FPV drone, humanitarian mission, Betaflight, servo control, cargo drop, 3D modeling.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	3
ВСТУП	4
1 6	
1.1 6	
1.2 10	
1.3 17	
1.4 19	
1.5 20	
2 22	
2.1 22	
2.2 34	
2.3 53	
3 54	
3.1 54	
3.2 86	
3.3 88	
4 90	
4.1 90	
4.2 97	
4.3 100	
ВИСНОВКИ	102
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	104
ДОДАТОК А Код програми	107
ДОДАТОК Б Матеріали апробації роботи	132

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА	– безпілотний літальний апарат
КМР	– кваліфікаційна магістерська робота
ПК	– польотний контролер
ПІД	– пропорційно-інтегрально-диференціальний
КСХ	– коефіцієнт стоячої хвилі
3D	– 3-dimensional
CLI	– Command Line Interface
CRSF	– Crossfire Serial Protocol
ELRS	– ExpressLRS
FHSS	– Frequency Hopping Spread Spectrum
FPV	– First Person View
LQ	– Link Quality
VTX	– Video Transmitter
DFU	– Device Firmware Upgrade
OSD	– On-Screen Display
PWM	– Pulse Width Modulation

ВСТУП

Застосування безпілотних літальних апаратів стало ключовим елементом у сучасній логістиці, моніторингу та, що особливо важливо, у зонах кризових ситуацій та гуманітарних місій. Актуальність теми обумовлена кількома критичними факторами, які набули особливої ваги в умовах, де традиційні канали постачання є небезпечними або повністю заблокованими.

По-перше, існує нагальна потреба в оперативній доставці критично важливих медикаментів, донорської крові, засобів зв'язку, води чи елементів живлення у важкодоступні або ізольовані райони. Використання великих транспортних БПЛА є економічно не вигідним для невеликих вантажів і часто вимагає складнішої інфраструктури. На противагу цьому, FPV-дрони, зібрані на базі відкритих рішень, вирізняються низькою вартістю, високою швидкістю розгортання та відносною непомітністю. Вони являють собою ідеальний компроміс між вартістю та оперативною ефективністю.

По-друге, вибір аналогової системи відеопередавач (5.8 ГГц) забезпечує високу стійкість до затримки відеосигналу, що є критично важливим для точного пілотування в умовах перешкод та складного рельєфу. Хоча цифрові системи пропонують вищу якість зображення, їхня вартість та чутливість до великих відстаней роблять аналогові рішення більш надійними та доступними для волонтерських та гуманітарних проєктів.

Об'єктом дослідження є процеси проєктування та інтеграції спеціалізованих апаратних і програмних рішень у системи БПЛА на базі відкритого програмного забезпечення Betaflight, що забезпечують розширення базового функціоналу квадрокоптера.

Предметом дослідження є архітектура аналогового FPV-дрона на 10-дюймовій рамі з функціями сервоуправління нахилом FPV-камери та механізмом скиду гуманітарного вантажу.

Метою роботи є проєктування, конфігурація та тестування аналогового 10-дюймового FPV-дрона з інтегрованим та керованим розширеним

функціоналом для забезпечення оперативної та точної доставки невеликих гуманітарних вантажів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання:**

- 1) провести огляд сучасних архітектур БПЛА, систем керування та VTX для гуманітарних місій та обґрунтувати вибір компонентної бази;
- 2) розробити схему підключення периферії до польотного контролера;
- 3) розробити 3D-моделі для механічного кріплення сервоприводу FPV-камери та механізму скиду вантажу;
- 4) розробити програмні моделі керування Betaflight CLI для виділених AUX-каналів, провести конфігурацію польотного контролера, включаючи налаштування протоколу керування ELRS (2.4 ГГц) та OSD;
- 5) провести тестування для оцінки роботи механізмів нахилу камери та скиду вантажу.

Практичне значення роботи полягає у створенні повноцінного, верифікованого та документованого інженерного рішення, готового до тиражування та негайного застосування.

Таким чином, результати роботи можуть бути використані як готовий технічний стандарт для створення FPV-дронів-логістів, що підвищить ефективність та безпеку доставки гуманітарної допомоги у зони стихійних лих та інші кризові регіони.

Апробація матеріалів кваліфікаційної магістерської роботи пройшла під час міжнародної-наукової конференції Modern Information Technology 2025, яка відбулась на базі Інституту комп'ютерних систем НУ «Одеська політехніка».

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ БПЛА ДЛЯ ДОСТАВКИ ГУМАНІТАРНИХ ВАНТАЖІВ

У цьому розділі проводиться комплексний аналіз поточних технічних рішень та архітектур безпілотних літальних апаратів, що застосовуються для виконання логістичних та гуманітарних завдань. Метою аналізу є обґрунтування вибору конкретної платформи та компонентної бази, орієнтованої на оптимальний баланс між вартістю, дальністю дії, надійністю та вантажопідйомністю, необхідними для оперативної доставки критично важливих вантажів.

1.1 Аналіз архітектур БПЛА для вантажних та гуманітарних місій

Ефективність гуманітарної місії, що виконується БПЛА, безпосередньо залежить від вибору його архітектури. Існуючі БПЛА для доставки вантажів можна умовно поділити на два основні класи: мультироторні системи (квадрокоптери, гексакоптери) та літальні апарати з фіксованим крилом («літаюче крило») [2].

1.1.1 Порівняння мультироторних та літальних апаратів «літаюче крило»

Вибір архітектури БПЛА для гуманітарної логістики є критичним рішенням, що базується на компромісі між дальністю, швидкістю, вантажопідйомністю та маневровістю.

Мультироторні системи функціонують, постійно протидіючи силі тяжіння за допомогою вертикальної тяги, що забезпечується пропелерами. Цей принцип зумовлює їхню головну слабкість – низьку енергоефективність у горизонтальному польоті. Основна енергія акумулятора витрачається на підтримку висоти, а не на поступальний рух, що обмежує їхню ефективну дальність польоту, як правило, до 15–30 км. Однак їхня ключова перевага полягає у високій маневреності та здатності до вертикального зльоту та

посадки або, у випадку FPV-дронів, до точного, контрольованого зависання та спуску. Це робить їх ідеальними для місій, що вимагають доставки вантажу у важкодоступні, обмежені або урбанізовані зони (наприклад, скидання медикаментів на дах будинку або у двір). 10-дюймова платформа має високий коефіцієнт тяги до ваги, забезпечуючи значну вантажопідйомність до 2–3 кг при відносно низькій вартості компонентів та простоті ремонту.

Літальні апарати з фіксованим крилом («літаюче крило»), навпаки, використовують аеродинамічну підйомну силу, що генерується крилом. Цей принцип забезпечує високу енергоефективність та, відповідно, значну дальність польоту, яка може сягати сотень кілометрів. Вони найкраще підходять для міжміської логістики або доставки на великі, відкриті території. Однак, «крила» вимагають або злітно-посадкової смуги, що часто неможливо в умовах гуманітарної кризи, або складної системи запуску. Вони також мають значно нижчу маневреність на малих швидкостях та не можуть зависати, що унеможливорює точковий скид вантажу з високою прецизійністю. Це робить їх непридатними для місії, де точність доставки, як у цьому проєкті, є пріоритетом.[1]

1.1.2 Огляд комерційних та FPV-платформ для логістики

На ринку професійних БПЛА для логістики та промислових інспекцій домінують комерційні системи, які слугують технологічним еталоном завдяки високій інтеграції, надійності та автономності. Однак, їхні критичні обмеження є вирішальними факторами при прийнятті рішення про розробку власного бюджетного БПЛА.

DJI Matrice Series

Серія DJI Matrice є флагманом у сфері комерційних промислових БПЛА. Платформи, як на рис. 1.1, спроектовані для важких умов та значних навантажень, часто використовуються в енергетиці, будівництві та пошуково-рятувальних операціях, що вимагають максимальної надійності та точності.

Технічні характеристики та переваги:

- 1) використання технології RTK або PPK забезпечує сантиметрову точність позиціонування. Це дає змогу планувати місії з високою просторовою прив'язкою, що корисно для картографування та автономної логістики;
- 2) системи живлення, навігації та зв'язку мають резервні канали, що значно підвищує безпеку польоту;
- 3) набір бінокулярних сенсорів та радарів забезпечує всенаправлене визначення та уникнення перешкод, дозволяючи автономний політ у складних умовах;
- 4) моделі M300/M350 можуть нести значне корисне навантаження до 2.7 кг і більше, забезпечуючи при цьому час польоту до 55 хвилин без навантаження.



Рисунок 1.1 – Промисловий дрон DJI Matrice 300 RTK [7]

Критичні недоліки для гуманітарного проекту:

- 1) вартість одного комплекту Matrice M350 RTK може перевищувати 20 000–30 000 USD. Ця ціна є непосильною для волонтерських та більшості гуманітарних місій, де тиражування є більш важливим, ніж технологічна надмірність;

2) для інтеграції будь-якого унікального периферійного пристрою, як-от кастомного механізму скиду або сервоприводу камери, що є метою даної роботи, необхідно використовувати Developer SDK від DJI. Це вимагає складного програмування, великих часових витрат та не гарантує повної гнучкості, яку надає відкритий код Betaflight;

3) комерційні платформи мають вбудовані обмеження на польоти, які можуть перешкоджати оперативному виконанню місій у зоні конфліктів чи над критичною інфраструктурою.

Таким чином, висока початкова вартість робить ці платформи недоступними для широкого використання у бюджетних гуманітарних операціях. Ця пропріетарність унеможливорює реалізацію індивідуальних, життєво необхідних функцій, що є основою даного дослідження. Таке автоматичне блокування польоту суперечить вимогам оперативності та абсолютної свободи дії, необхідної для гуманітарної доставки.

Autel EVO Max

Дрони Autel EVO Max є прямим конкурентом DJI та також пропонують високий рівень інтелектуальних функцій, орієнтованих на промислове використання. Вони вирізняються своєю автономністю та компактністю порівняно з серією Matrice.

Технічні характеристики та переваги дрону на рис. 1.2:

1) використання передових алгоритмів штучного інтелекту для розпізнавання об'єктів та динамічного планування маршруту в реальному часі;

2) здатність зберігати позиціонування у середовищах, де сигнал GPS/GNSS заблоковано або відсутній, використовуючи візуальне позиціонування та внутрішні сенсори;

3) часто мають вищий ступінь захисту від пилу та вологи (IP-рейтинг), що підвищує надійність у несприятливих погодних умовах.



Рисунок 1.2 – Autel EVO Max 4T [8]

Як і у випадку з DJI, компоненти Autel є пропрієтарними. Заміна навіть невеликого елемента, наприклад, ESC чи моторної групи, вимагає дорогих модулів від виробника. Це різко збільшує операційні витрати (ОРЕХ) та час простою дрона [3].

Хоча вони використовують цифрові канали передачі відео, вони не досягають нульової затримки, характерної для аналогових FPV-систем. У режимі ручного, високоточного керування, необхідного для скиду, навіть невелика затримка (50–100 мс) може бути критичною.

Для завдань, визначених у даній роботі, комерційні платформи є надмірно дорогими, надмірно складними та, що найважливіше, програмно закритими. Вибір FPV-платформи на відкритому програмному забезпеченні є єдиним економічно обґрунтованим і технічно гнучким шляхом для досягнення поставленої мети.

1.2 Огляд технічних рішень для систем керування та навігації

1.2.1 Аналіз польотних контролерів на базі мікроконтролерів STM32

Польотний контролер (ПК) є «мозком» БПЛА, відповідальним за збір даних із сенсорів (гіроскоп, акселерометр), виконання ПД-регулювання, а також комунікацію з усіма периферійними пристроями.

Мікроконтролер STM32F405 на якому базується Speedybee F405 V3 працює на тактовій частоті 168 МГц. Ця частота є більш ніж достатньою для виконання всіх критично важливих завдань FPV-дрона.

Таблиця 1.1 – Порівняння мікроконтролерів STM32F4 та STM32F7 для FPV-застосувань

Характеристика	STM32F405	STM32F745/722	Відмінність та вплив на проєкт
Архітектура	ARM Cortex-M4	ARM Cortex-M7	F7 має подвійну точність обчислень та кращий конвеєр (Pipeline), що дає вищу теоретичну продуктивність.
Тактова частота	168 МГц	216 МГц	F7 значно швидший, що дозволяє вищу частоту циклу ПІД (Looptime), але для аналогового дрона F4 (8 кГц) є достатнім.
Кеш-пам'ять	Flash	Інтегрована Cache	F7 має кеш-пам'ять, що прискорює доступ до інструкцій та даних, покращуючи продуктивність у реальному часі.

Обсяг RAM	192 КБ SRAM	320 КБ SRAM	Більший обсяг RAM у F7 важливий для складних алгоритмів, але не є критичним.
FPU (Floating Point Unit)	Одинарна точність	Одинарна точність	Обидва мають FPU для швидких обчислень з плаваючою комою, що важливо для ПД-регулювання.
Ціна	Низька / Середня	Середня / Висока	F405 є більш бюджетним рішенням, що відповідає меті тиражування дрона для гуманітарних місій.

Мікроконтролер STM32F405, попри нижчу тактову частоту, забезпечує необхідну продуктивність для обробки циклу ПД, управління сервоприводами та комунікації з усіма периферійними пристроями. Його ключова перевага для цього проєкту – краще співвідношення ціна/продуктивність, що дозволяє максимально знизити вартість кінцевого виробу [4].

На рис. 1.3 обрана платформа Speedybee F405 V3 її вибір обґрунтований високою надійністю, вбудованим високоточним барометром, а також наявністю додаткових, легкодоступних контактів (Resource Remapping), які можуть бути програмно перепризначені з функцій ESC на виходи PWM для керування сервоприводами. Це ключовий фактор, оскільки стандартні мотори займають лише 4 виходи, залишаючи вільні лінії для додаткових сервоприводів.



Рисунок 1.3 – Стек Speedybee F405 V3

У порівнянні з дорожчими F7 або H7 (з частотою до 480 МГц), F405 пропонує оптимальне співвідношення продуктивності та вартості, уникаючи надмірної потужності, яка не є критичною для аналогової FPV-системи, але суттєво впливає на кінцеву ціну БПЛА.

1.2.2 Порівняння частот керування та обґрунтування вибору 2.4 ГГц

Надійний канал радіокерування (RC link) є життєво необхідним для FPV-дрона, особливо під час місій на великій дальності та при виконанні складних маневрів скиду.

Таблиця 1.2 – Порівняння основних частот радіокерування БПЛА

Характеристика	433 МГц	915/868 МГц	2.4 ГГц
Призначення	Далекі польоти (Ultra Long Range)	Середній та Дальній радіус (Long Range)	Середній та ближній радіус, гонки/фрістайл (Short/Medium Range)
Дальність	Найвища (>50 км). Краще проникнення через перешкоди (будівлі, дерева).	Висока (20–40 км). Дуже добре проникнення.	Обмежена (10–30 км з високою потужністю), функціонує через бетон.
Пропускна здатність/Затримка	Низька швидкість, висока затримка.	Середня швидкість, дуже низька затримка	Найвища швидкість, найнижча затримка.
Розмір антени	Найбільший (критично великий). Антена 1/4 хвилі близько 17 см.	Середній (антена 1/4 хвилі близько 8.5 см).	Найменший (антена 1/4 хвилі близько 3 см). Легко інтегрується.
Перешкодозахищеність	Висока	Дуже висока.	Завантажений діапазон (Wi-Fi, Bluetooth)

ExpressLRS (ELRS) 2.4 ГГц є відкритим протоколом, який використовує технологію LoRa та агресивну частотну маніпуляцію FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), що забезпечує високу стійкість до перешкод.

На рис. 1.4 плата ESP 8285 Betafpv 2.4 Nano RX, яка була обрана для проєкту за такими причинами:

1) ELRS може працювати на пакетних частотах до 1000 Гц (1 кГц), що означає, що команди пілота оновлюються на дроні кожен мілісекунду. Для FPV-дрона, що вимагає ручного керування під час точного скиду, низька затримка є критичною для запобігання помилкам;

2) хоча частоти 915/868 МГц (LORA) забезпечують більшу теоретичну дальність та краще проникнення, сучасні 2.4 ГГц ELRS-системи, що працюють з потужністю до 1 Вт, легко досягають та перевищують 20-30 км. Цей діапазон є достатнім для більшості гуманітарних місій, які можуть бути виконані 10-дюймовим дроном;

3) приймачі Betafrv 2.4 Nano RX є одними з найменших та найлегших, що мінімізує вплив на аеродинаміку та вагу дрона. Це, в поєднанні з низькою вартістю, робить систему ідеальною для тиражування.



Рисунок 1.4 – ESP 8285 Betafrv 2.4 Nano RX

Приймач підключається до ПК по протоколу CRSF. Цей протокол передає не лише команди керування, а й телеметрію (напругу акумулятора, RSSI/Link Quality – якість зв'язку). Метрика Link Quality, яка відображається на OSD, є ключовою для пілота, щоб своєчасно прийняти рішення про повернення дрона до бази до повної втрати керування. На рис. 1.5 надана схема повного циклу роботи передачі даних керування та отримання відео гуманітарного дрона.

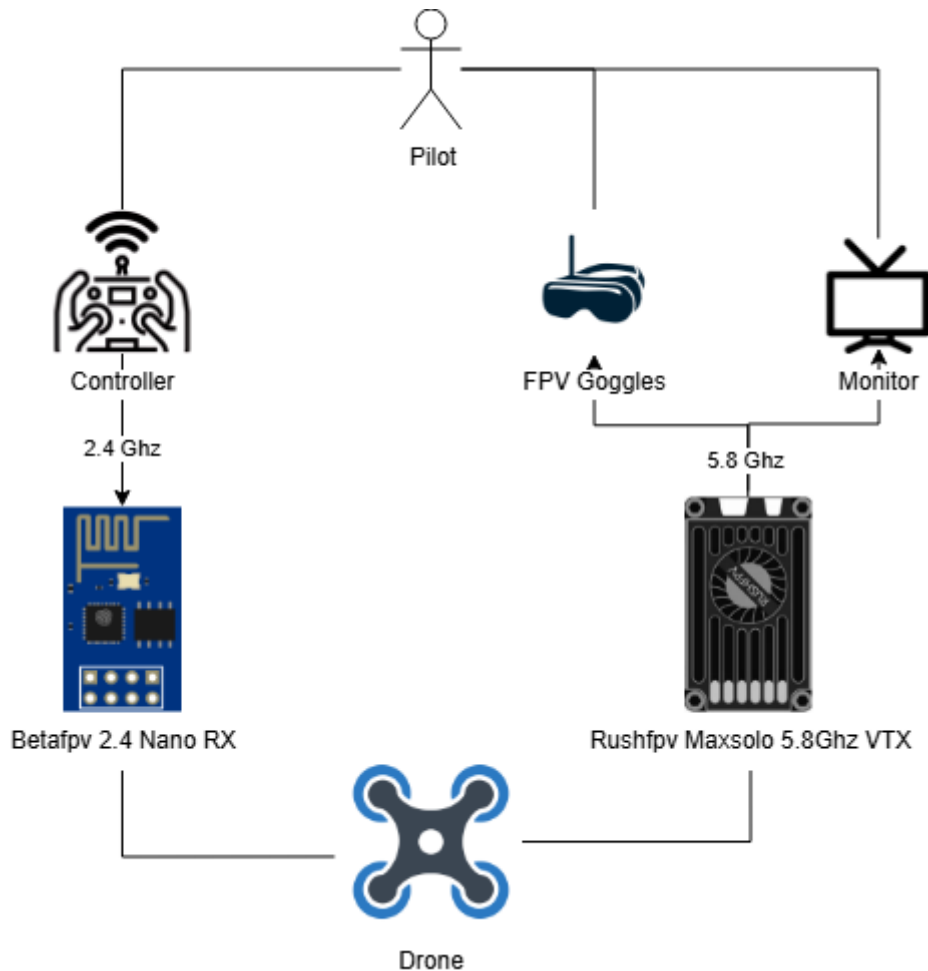


Рисунок 1.5 – Схема передачі даних дрона

1.2.3 Принципи роботи аналогових систем

Відеоканал у FPV-дронах забезпечується аналоговими системами на частоті 5.8 ГГц. На відміну від цифрових систем, аналоговий сигнал не вимагає складної кодування/декодування, забезпечуючи практично нульову затримку (близько 0–5 мс). Ця особливість є вирішальною, оскільки будь-яка затримка відео може призвести до дезорієнтації пілота та, як наслідок, до неточності скиду або аварії.

Технічні характеристики VTX:

- 1) міжнародний промисловий, науковий та медичний ISM діапазон. Канали розподілені на 5-8 бандів;

2) регулюється від 25 мВт до 1000–2000 мВт для низьких або далеких польотів . Підвищення потужності значно покращує дальність та стійкість сигналу, але збільшує тепловиділення та енергоспоживання.

Для оперативного керування VTX використовується протокол SmartAudio. Цей протокол є однодротовим двонаправленим зв'язком, який використовує вільний UART-порт ПК.

Операційна перевага SmartAudio:

1) пілот може змінювати частоту, канал та потужність VTX безпосередньо через екранне меню Betaflight, використовуючи стіки апаратури керування. Це усуває необхідність фізичного доступу до дрона та маніпуляцій з кнопками, що є критично важливим у польових умовах;

2) можливість швидкого перемикання з мінімальної потужності (25 мВт) під час налаштування, для уникнення перешкод іншим пілотам на максимальну потужність (1000 мВт) безпосередньо перед місією, що забезпечує максимальну ефективність використання ресурсу;

3) у разі появи перешкод від невідомих джерел, SmartAudio дозволяє пілоту швидко змінити канал для відновлення чистого відеосигналу.

Обидва протоколи – SmartAudio та IRC Tramp – виконують ідентичне завдання: дозволяють двонаправлений обмін даними між польотним контролером і відеопередавачем через один провід, забезпечуючи керування VTX через екранне меню. Їхня ключова відмінність полягає у розробнику та внутрішній структурі команд. Вибір SmartAudio для цього проекту продиктований його широкою поширеністю в обраній компонентній базі, що забезпечує більшу гнучкість при виборі конкретного VTX.

1.3 Аналіз існуючих механізмів доставки вантажів та керування корисним навантаженням

Розробка надійного та точного механізму скиду є основною метою проекту. Серед рішень, сумісних із FPV-платформами, домінують два типи: електромагнітні та сервомеханічні.

Сервомеханічні механізми використовують стандартний сервопривід (наприклад, TowerPro SG90 або металевий редуктор для більшого навантаження) для фізичного відкриття або закриття запірної елемента. Електромагнітні механізми використовують електромагніт для утримання металевих елементів на вантажі.

Сервомеханічний механізм обрано як оптимальне рішення, що забезпечує надійність, низьке енергоспоживання, простоту програмування та мінімальний вплив на загальну вагу дрона.

1.3.1 Роль керованого нахилу камери в FPV-дронах

Стандартні FPV-дрони мають фіксований кут нахилу камери, зазвичай в діапазоні 25° – 40° . Цей кут оптимізований для високої швидкості, оскільки для компенсації швидкості дрон нахиляється вперед, і камера повертається в горизонтальне положення, забезпечуючи пілоту комфортний огляд.

Під час доставки вантажу дрон повинен:

- 1) летіти повільніше;
- 2) зупинитися або зависати для точного прицілювання.

Якщо кут камери фіксований (30°), при зависанні пілот бачитиме лише небо або горизонт, а простір безпосередньо під дроном буде недоступним для огляду.

Вирішення даної проблеми:

- 1) інтеграція сервоприводу для керування вертикальним нахилом FPV-камери дозволяє пілоту динамічно змінювати поле огляду;
- 2) кут можна збільшити до $+20^{\circ}$ для кращого огляду вперед при швидкому польоті;
- 3) кут можна зменшити до 0° або навіть негативного кута -10° для огляду простору безпосередньо під носом дрона. Це критично важливо для ідентифікації цільової зони та точного позиціонування перед скидом;
- 4) на відміну від механізму скиду, який є дискретним, нахил камери потребує пропорційного керування. У Betaflight CLI функція `SERVO_TILT`

призначається на пропорційний канал AUX. Пілот отримує можливість плавного керування кутом камери в заданому діапазоні.

Введення цієї функції суттєво знижує когнітивне навантаження на пілота та є ключовим фактором підвищення точності доставки, оскільки пілот отримує необхідну ситуаційну обізнаність у критичний момент зависання та маневрування.

1.4 Специфікація вимог до розроблюваного БПЛА

Проведений аналіз дозволяє сформулювати чіткий набір вимог до кінцевого продукту, які є основою для етапу проєктування. Ці вимоги розділені на апаратні та програмні.

Апаратні вимоги: Дрон має бути зібраний на 10-дюймовій рамі, що забезпечує необхідний простір для монтажу. Використовуватиметься польотний контролер Speedybee F405 V3 (МК STM32F405) як бюджетне та високопродуктивне рішення, здатне підтримувати необхідну частоту циклу ПД. Система керування – ExpressLRS 2.4 ГГц для забезпечення дальності та низької затримки. Відеосистема – аналоговий VTX RushFPV MaxSolo 5.8 ГГц з підтримкою протоколу SmartAudio для оперативного керування.

Функціональні вимоги до програмного забезпечення Betaflight:

Програмне забезпечення повинно підтримувати реалізацію двох ключових функціональних моделей корисного навантаження. По-перше, забезпечення надійного керування сервоприводом для механізму скиду, що вимагає програмного перепризначення ресурсів невикористовуваних виводів ПК на виходи PWM. По-друге, необхідне налаштування режиму пропорційного керування сервоприводом нахилу камери (SERVO_TILT), з прив'язкою до каналу AUX, та калібруванням меж кутів у діапазоні від -10° до $+30^\circ$. Також система повинна забезпечувати двосторонній зв'язок (CRSF Telemetry, SmartAudio Telemetry) та відображення критично важливої інформації (напруга, якість зв'язку (LQ)) через OSD для безпечної експлуатації та підвищення точності прицілювання.

Нефункціональні вимоги до програмного забезпечення (Обмеження та якості):

Основною нефункціональною вимогою є висока продуктивність та стабільність системи. Частота циклу ПІД повинна бути встановлена на рівні не нижче 4кГц для забезпечення необхідної стійкості великої платформи. Безпека експлуатації вимагає наявності чітко налаштованих режимів FailSafe, що автоматично ініціюються при критичному зниженні якості радіозв'язку. Також необхідно забезпечити сумісність програмного забезпечення з протоколом DShot для керування моторами та мінімізувати загальну затримку керування до рівня менше 20мс для точного маневрування під час фінального скиду.

1.5 Висновок до розділу 1

У результаті проведеного аналізу сучасного стану технологій БПЛА для виконання гуманітарних місій було науково обґрунтовано вибір архітектури та компонентної бази для подальшої розробки.

Було прийнято рішення про розробку БПЛА на базі 10-дюймової мультироторної FPV-платформи, оскільки вона забезпечує необхідну маневреність, точність зависання та економічну ефективність, що є критично важливим для оперативного доставлення малогабаритних вантажів у складні умови.

Ключові технічні рішення, обґрунтовані в розділі:

1) вибір Speedybee F405 V3 обґрунтований оптимальним співвідношенням продуктивності STM32F405 та наявністю необхідної кількості UART/PWM виводів для керування додатковими сервоприводами;

2) обґрунтовано використання ExpressLRS 2.4 ГГц для забезпечення надійного, низькозатримкового керування та аналогового відео 5.8 ГГц з протоколом SmartAudio для оперативного налаштування потужності та частоти VTX через OSD;

3) встановлено, що сервомеханічний механізм скиду є енергоефективнішим та простішим в інтеграції з Betaflight CLI порівняно з електромагнітними аналогами;

4) доведено критичну роль інтеграції керованого сервоприводу нахилу камери для підвищення ситуаційної обізнаності та досягнення необхідної точності скиду вантажу.

Встановлено, що комерційні платформи, попри їхню високу автономність, є неприйнятними через високу вартість та закрите програмне забезпечення, яке блокує інтеграцію кастомних функцій.

2 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ БПЛА

Проектування апаратної частини БПЛА є етапом, на якому теоретичні висновки та вимоги, сформульовані в розділі 1, трансформуються у фізичну конструкцію та схему підключення периферії до ПК. Цей розділ деталізує вибір конкретних компонентів, розрахунок їхніх характеристик та послідовність інтеграції, необхідної для забезпечення функціоналу керування сервоприводами та скиду вантажу.

Етап підготовки є критично важливим для забезпечення надійності та довговічності FPV-дрона, особливо враховуючи високе навантаження та екстремальні умови гуманітарних місій. Збірка починається з інспекції та підготовки основних компонентів.

2.1 Послідовність апаратної збірки

2.1.1 Підготовка рами

Якість кінцевої збірки, а отже, і надійність БПЛА, безпосередньо залежить від ретельності підготовки компонентів перед паянням. Цей процес охоплює як механічну, так і електронну підготовку.

На рис. 2.1 перед монтажем проводиться огляд та механічна підготовка 10-дюймової рами, що мінімізує ризики пошкодження проводки та послаблення конструкції внаслідок вібрації.

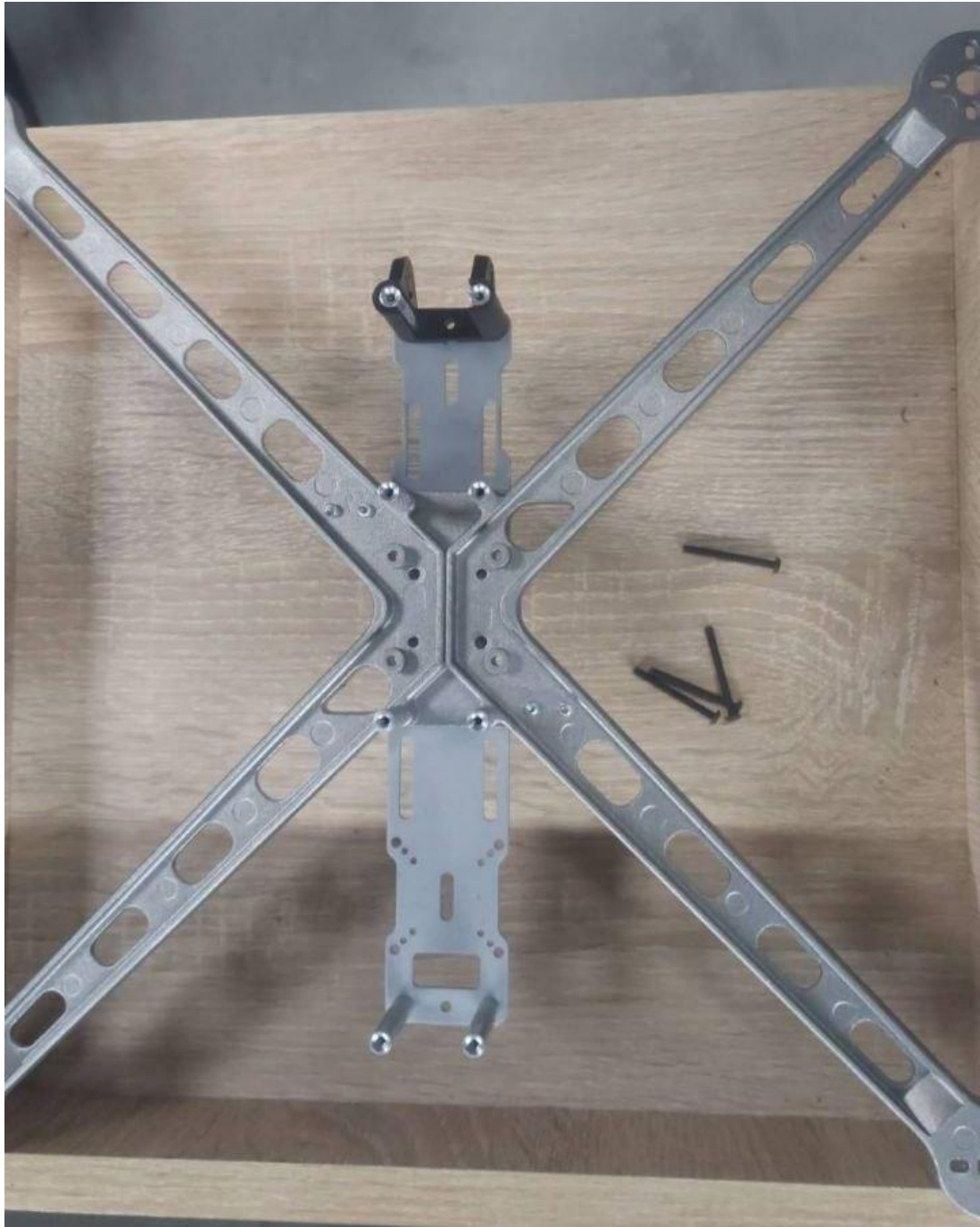


Рисунок 2.1 – Рама БПЛА

Алюмінієва рама є провідником електричного струму. Будь-яка необережна чи гостра кромка може пошкодити ізоляцію проводів моторів чи сигнальних ліній, спричинивши коротке замикання. Всі гострі торці рами, особливо в місцях проходження дротів, обробляються дрібнозернистим наждачним папером [5].

Внаслідок постійної високочастотної вібрації, створюваної моторами, гвинти та гайки можуть самовідкручуватися. Для запобігання цьому всі силові з'єднання фіксуються різьбовим герметиком середньої фіксації. Цей герметик забезпечує стійкість з'єднання, але дозволяє його розбирання при ремонті.

2.1.2 Підготовка електронного регулятора швидкості

ESC є елементом, що найбільше піддається струмовому та тепловому навантаженню. Його підготовка включає забезпечення надійного живлення та захисту. На рис. 2.2 зображено обрану ESC Speedybee F405 4-in-1.

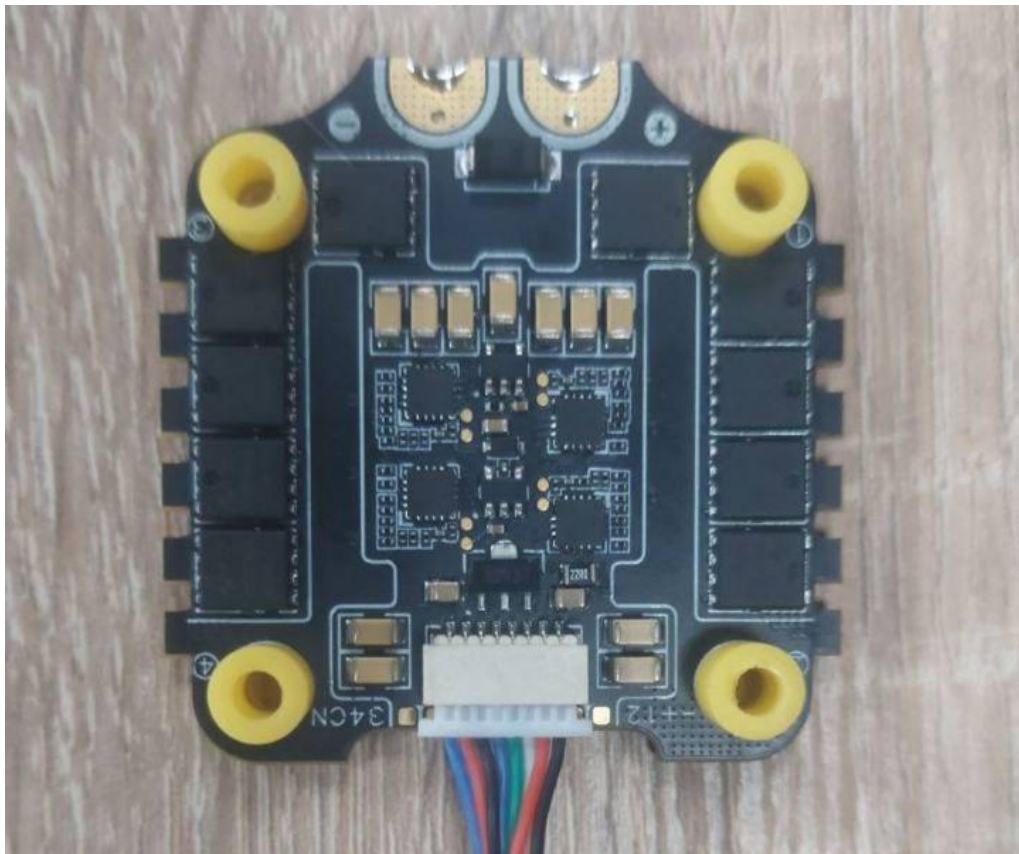


Рисунок 2.2 – Електронний регулятор швидкості

На рис. 2.3 зображено схему розпайки силових кабелів, конденсатору та моторів.

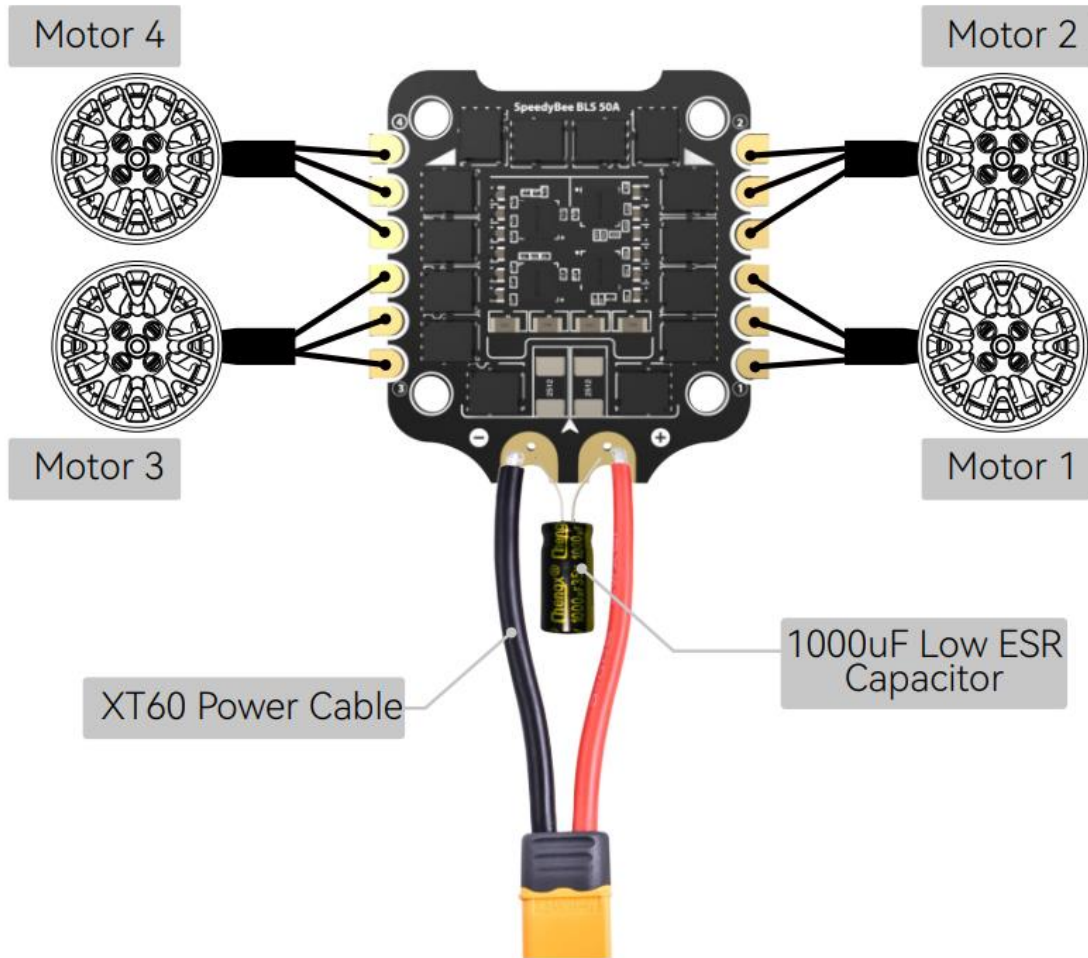


Рисунок 2.3 – Схема підключення двигунів і силового кабелю

Перед паянням силових дротів (до акумулятора) на контакти BAT+ та BAT- плати ESC обов'язково припаюється силовий конденсатор. На рис. 2.4 зображений ізольований та подовжений конденсатор 1000 мкФ для акумулятора з напругою 6S.



Рисунок 2.4 – Заводський конденсатор стеку Speedybee F405

Конденсатор слугує для фільтрації струмових стрибків, що виникають під час зміни обертів моторів. Це запобігає пошкодженню транзисторів MOSFET на ESC та зменшує шуми в живленні, що є критичним для чистоти відеосигналу.

З метою оптимізації фільтрації та спрощення монтажу на рамі, оригінальні жорсткі ніжки конденсатора були замінені на короткі, гнучкі силові кабелі (типу 16 AWG). Таке рішення має дві ключові переваги. По-перше, гнучкість дозволяє розташувати конденсатор у найбільш зручному та захищеному місці на рамі, мінімізуючи ризик його механічного пошкодження під час аварії. По-друге, використання багатожильного дроту замість жорсткої ніжки знижує індуктивність з'єднання. Нижня індуктивність забезпечує більш ефективну та швидку реакцію конденсатора на високочастотні струмові шуми, що виникають внаслідок роботи ESC. Це призводить до кращого згладжування пульсацій на лінії живлення та загального підвищення стабільності електричної системи дрона. З'єднання кабелів з ніжками конденсатора було ретельно ізольоване термоусадкою для запобігання коротким замиканням.

На рис. 2.5 для забезпечення максимальної пропускну здатності та мінімізації теплових втрат для 10-дюймової платформи використовуються силові кабелі 12 AWG. Паяння цих дротів до контактних майданчиків ESC є

найвідповідальнішим етапом. Спочатку обидва майданчики ретельно лудяться з використанням флюсу, щоб припій рівномірно розподілилася по всій площі. Потім залуджені кінці кабелів 12 AWG прикладаються до майданчиків, і з мінімальною затримкою, але при високій температурі паяльника, близько 400 °С, припаюються.



Рисунок 2.5 – Напаяний силовий кабель з конектором XT60

Головна мета – це забезпечити механічно міцний і електрично надійний шов, що має мінімальний опір, без перегріву плати. Після паяння дроти, що ведуть до XT60-конектора, повинні бути захищені термоусадкою або спеціальним кріпленням, щоб запобігти відриву від плати під час експлуатації.

На рис. 2.6 зображено підготовлений стек під пайку моторів до ESC.

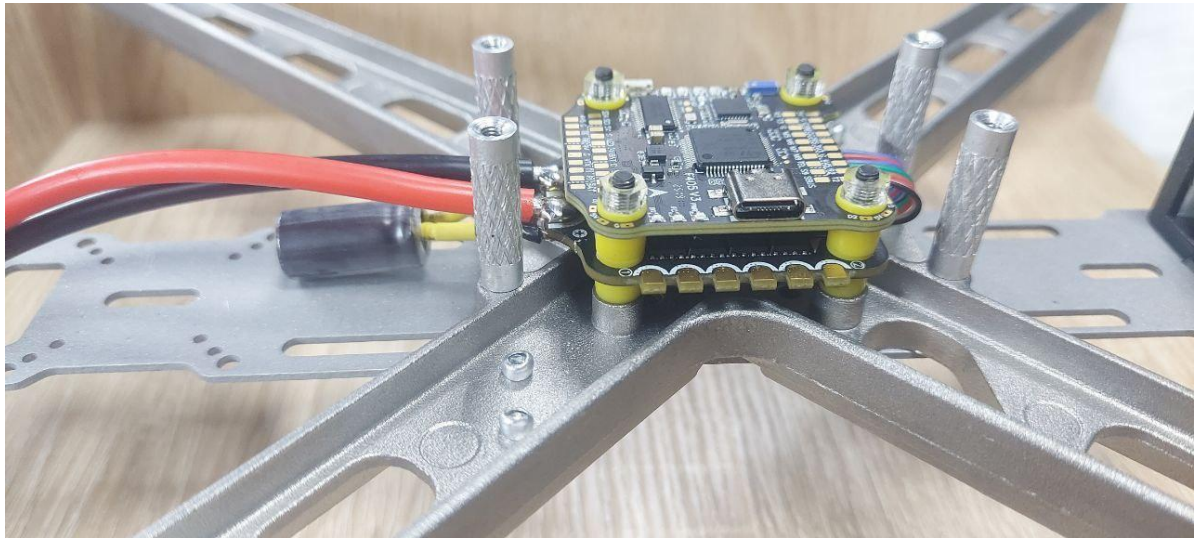


Рисунок 2.6 – Зібраний стек Speedybee F405 на рамі

2.1.3 Підготовка безколекторних двигунів 3115 900KV

Двигуни є ключовими виконавчими елементами. Правильна підготовка забезпечує надійність з'єднання та запобігає пошкодженню обмоток. На рис. 2.7 зображено двигуни з маркуванням 3115 900KV



Рисунок 2.7 – Мотори ReadyToSky 3115 900KV

Три силові дроти, що виходять із двигуна, повинні бути обрізані до необхідної довжини, щоб мінімізувати їхній опір та вагу, але при цьому забезпечити можливість ремонту. Кінці дротів зачищаються від ізоляції та обов'язково лудяться тонким шаром припою. Якість паяння безпосередньо впливає на передачу енергії, тому паяння до ESC повинно бути виконано швидко та при достатній температурі паяльника, щоб уникнути перегріву та пошкодження обмоток або транзисторів ESC. На рис. 2.8 встановлено усі мотори на раму [6].



Рисунок 2.8 – Фінальний монтаж стека

2.1.4 Розробка електричної схеми та інтеграція електроніки на польотний контролер

ПК є центром комунікації, і його підготовка сфокусована на забезпеченні чистоти сигнальних ліній. Лудяться всі необхідні контакти для периферії: UART для приймача (RX/TX), контакт SmartAudio для VTX, контакти камери, а також майданчики PWM/GPIO, які будуть використовуватися для керування сервоприводами [9].

UART – це універсальний асинхронний приймач-передавач, який є одним із найпоширеніших апаратних інтерфейсів для послідовного зв'язку між мікроконтролером та периферійними пристроями. UART використовує два дроти для передачі даних: TX та RX. Кожен UART-порт є незалежним каналом, що дозволяє ПК одночасно спілкуватися з різними пристроями. Правильне призначення периферії на вільні UART-порти є критично важливим для уникнення конфліктів та забезпечення функціональності.

Електрична схема на рис. 2.9 демонструє підключення ключових систем зв'язку та відео до польотного контролера Speedybee F405 V3.

Приймач ELRS підключається до ПК по протоколу CRSF, що вимагає повноцінного UART-порту для двонаправленого зв'язку.

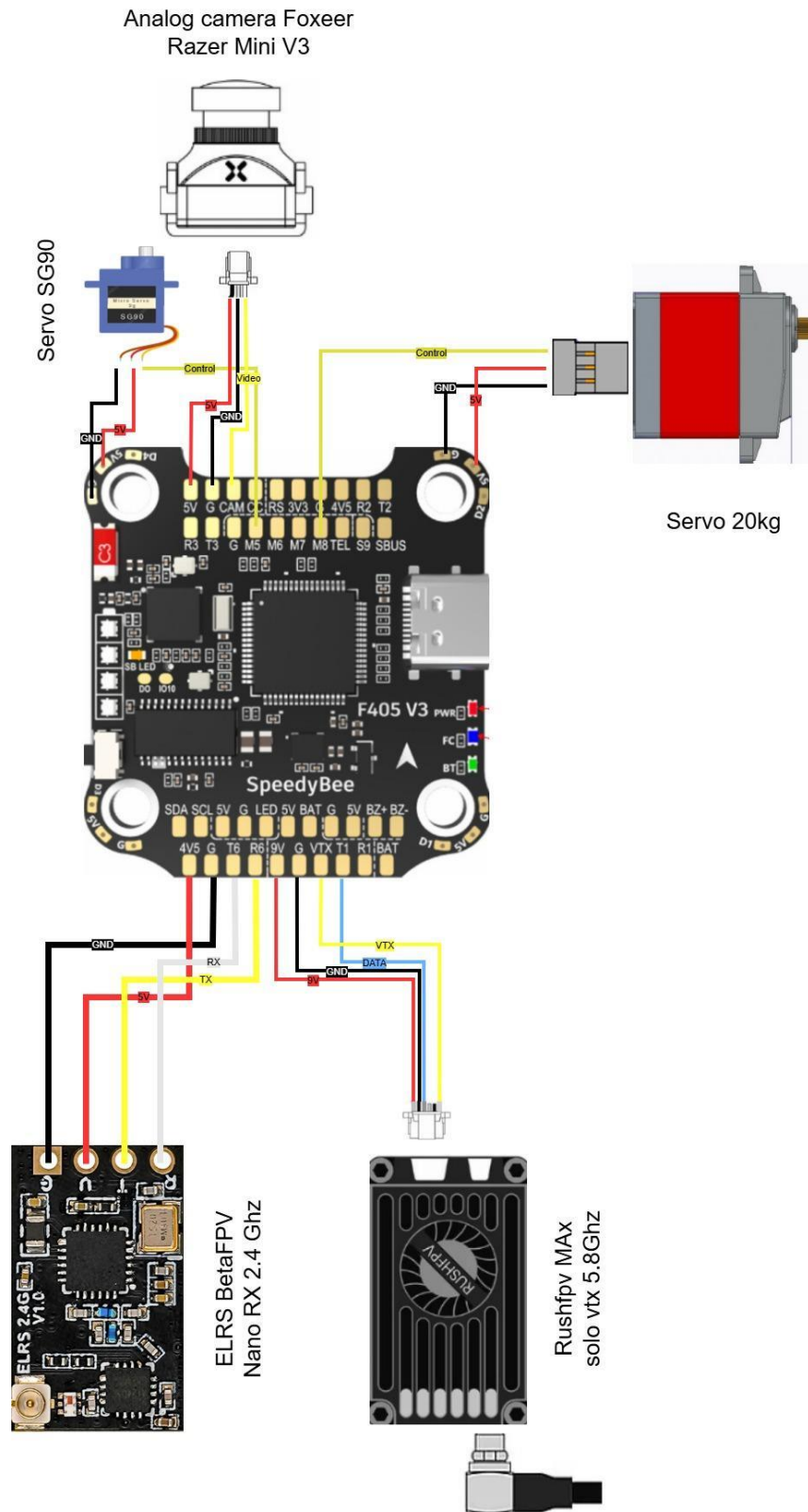


Рисунок 2.9 – Схема підключення периферії до ПК

Згідно зі схемою, для ELRS було обрано UART6 з маркуванням RX6 та TX6.

Згідно з рисунком 2.10 вихід передачі даних від TX приймача паяється до вхідного контакту ПК RX6. Вхід прийому даних RX приймача паяється до вихідного контакту ПК TX6. Живлення приймача 4v5В та земля підключаються до відповідних майданчиків поряд з UART6, що забезпечує стабільне живлення [10].

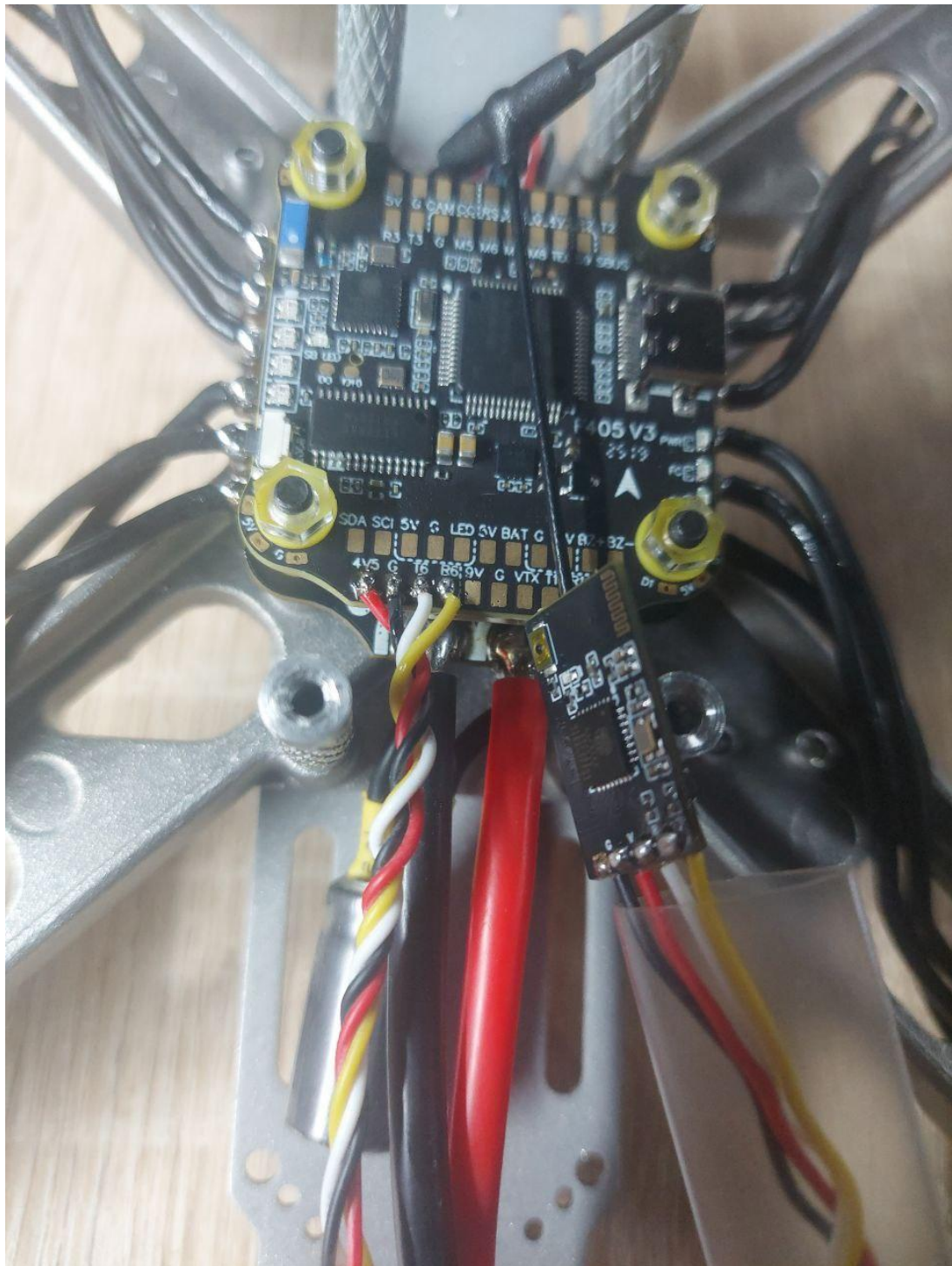


Рисунок 2.10 – Розпіновка ELRS BetaFPV Nano RX 2.4

VTX RushFPV MaxSolo підтримує протокол SmartAudio, що дозволяє дистанційно керувати його параметрами через OSD.

На рис. 2.11 сигнальний провід VTX (DATA/SmartAudio) паяється до контакту TX1 на ПК. Відеосигнал (Video In) подається від ПК (VTX) до відеовходу VTX. Живлення VTX подається від лінії 9В, а земля підключається до відповідного майданчика.

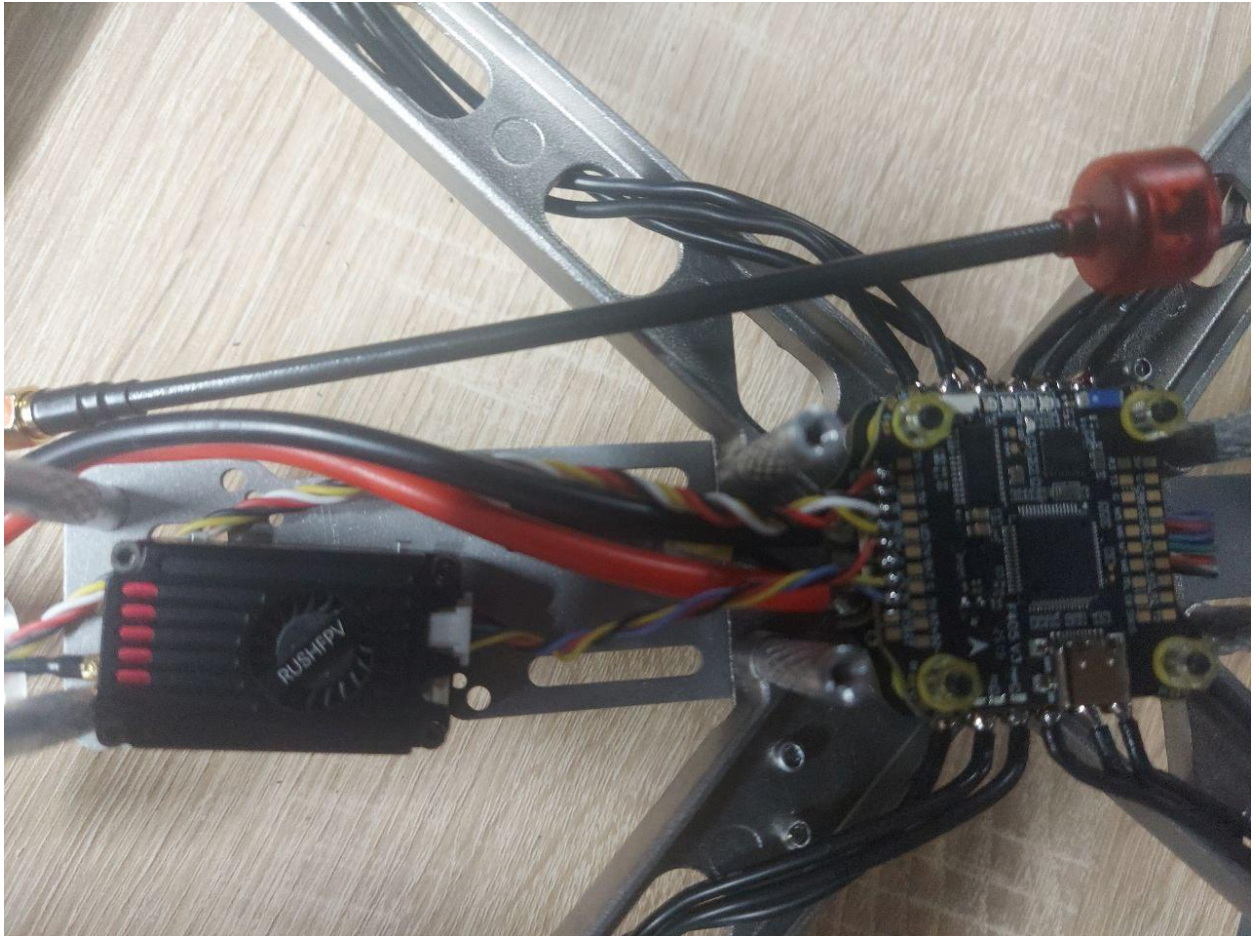


Рисунок 2.11 – Підключення Rushfpv Max solo vtx

У підрозділі було успішно розроблено та детально описано електричну схему інтеграції всіх ключових компонентів БПЛА на базі польотного контролера Speedybee F405 V3, відповідно до вимог, сформульованих у розділі 1. Проведена робота підтверджує можливість апаратної реалізації розширеного функціоналу.

Основні результати інтеграції:

1) забезпечено підключення RC-приймача (ELRS Betafpv 2.4 Nano RX) до UART6 для використання високошвидкісного протоколу CRSF, що є критичним для мінімальної затримки керування.

2) підключено VTX RushFPV MaxSolo до UART1 через протокол SmartAudio, що дозволяє пілоту оперативно змінювати потужність та канал відеопередавача через екранне меню, підвищуючи адаптивність дрона в польових умовах.

3) визначено та фізично підключено два спеціалізовані сервоприводи SG90 та 20кг до невикористовуваних моторних виводів M5 та M8. Це закладає апаратну основу для програмного перепризначення ресурсів у Betaflight, що дозволить керувати нахилом камери та механізмом скиду.

4) підтверджено коректне підключення силових компонентів (XT60, конденсатор) та грамотне розподілення живлення 5В та 9В від ВЕС на всі периферійні пристрої, з урахуванням високого струмового навантаження потужного сервоприводу.

Таким чином, всі апаратні комунікації встановлені, і електрична схема повністю готова до переходу на етап програмної конфігурації польотного контролера.

2.2 Механічне проєктування спеціалізованих модулів.

2.2.1 Моделювання та 3D-друк хвостового кріплення для систем зв'язку

Надійне розташування та фіксація антен радіокерування ELRS та відеопередачі VTX є критично важливими для забезпечення максимальної дальності та стійкості зв'язку. Для мінімізації негативного впливу вібрації та підвищення захисту було розроблено індивідуальне хвостове кріплення, яке інтегрується з рамою БПЛА [11].

На рис. 2.12 моделювання кріплення було виконано в системі автоматизованого проєктування Autodesk Fusion 360 . Це програмне забезпечення було обрано завдяки його високій точності для інженерного моделювання та можливості інтеграції з параметрами рами. Проєктування здійснювалося на основі послідовності етапів:

1) насамперед, було створено ескіз, що точно відповідав розмірам кріпильних стійок (standoffs) задньої частини рами та їхній міжосьовій відстані, що забезпечило ідеальну посадку кріплення;

2) враховуючи необхідність захисту антени VTX та RX, були спроектовані внутрішні порожнини та канали. Створено спеціальний фіксатор для антени ELRS, який розташовує її вертикально для максимального всенаправленого покриття та відділяє від алюмінію, мінімізуючи ефект «затінення»;

3) створено відсік, який точно відповідає габаритам конектора антени VTX, забезпечуючи його надійну фіксацію;

4) для протидії високочастотній вібрації та інерційним навантаженням під час маневрів, до корпусу були додані ребра жорсткості, що підвищило стійкість конструкції. На корпус було нанесено маркування групи «605M», що слугує ідентифікаційним елементом.

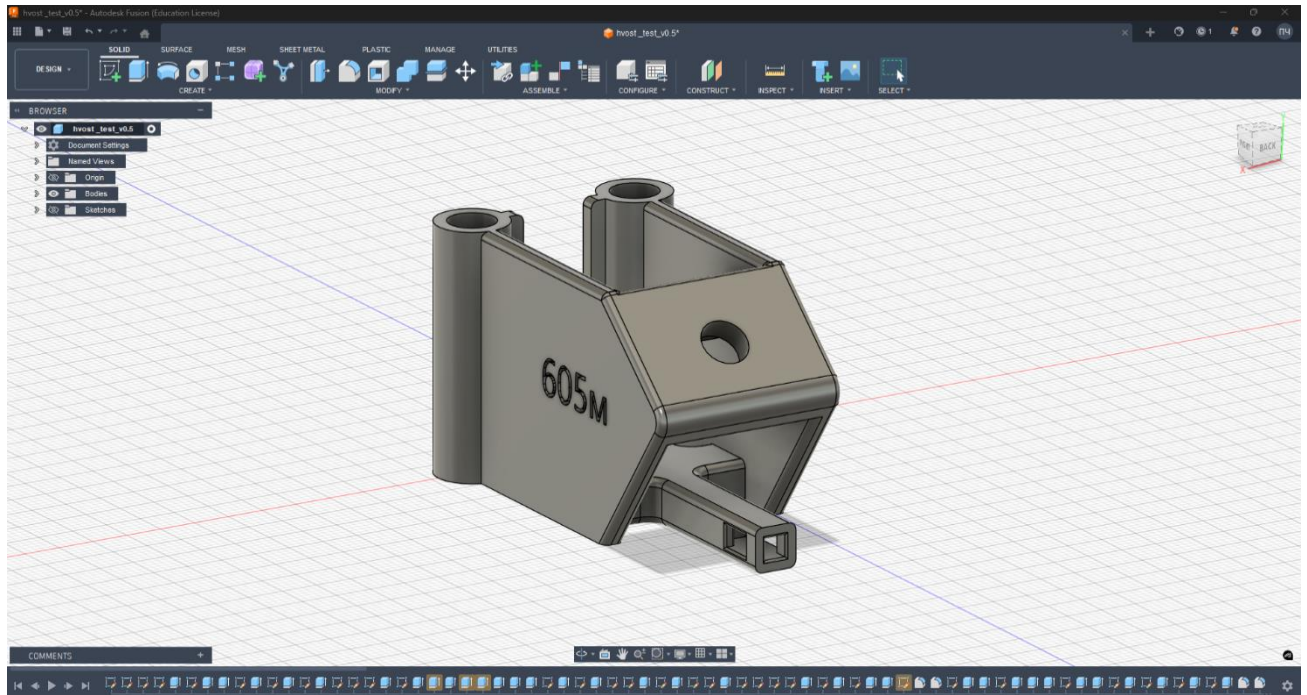
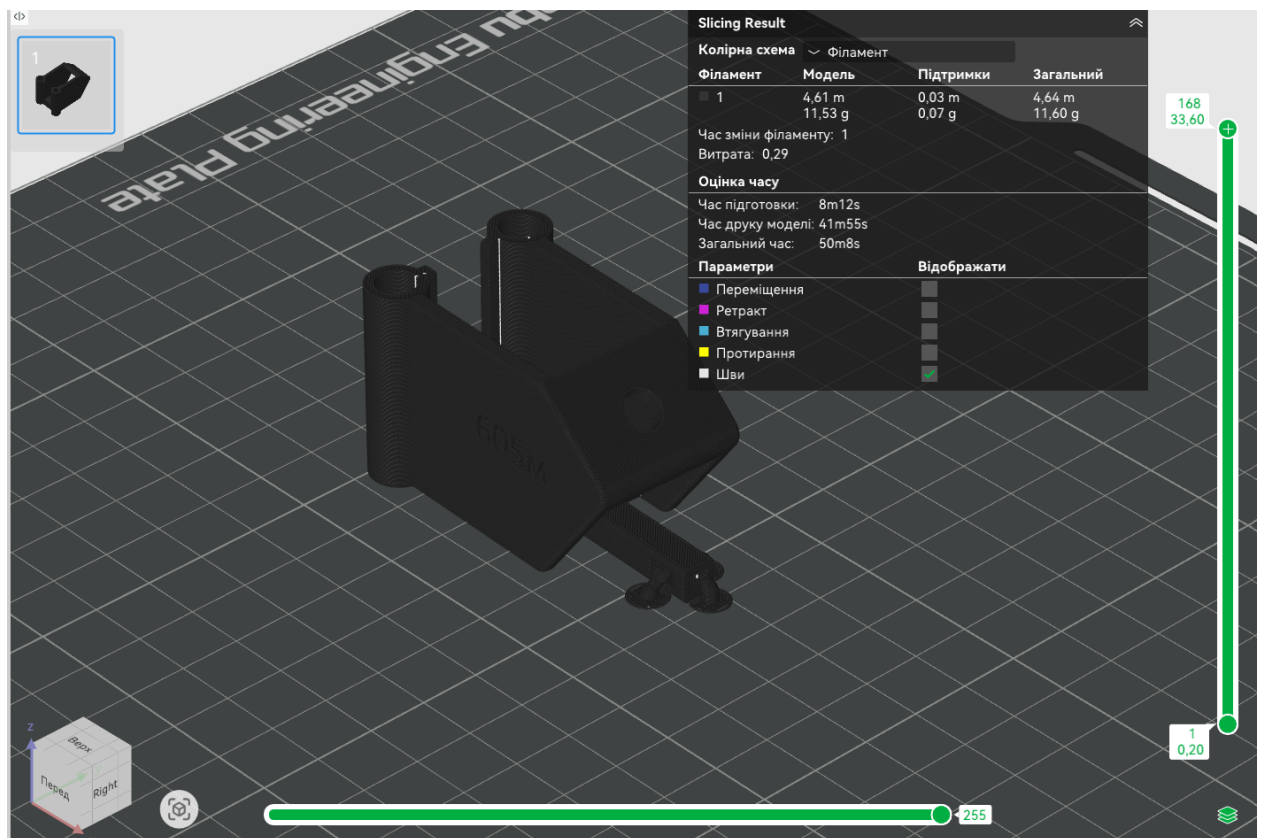


Рисунок 2.12 – Модель хвостового кріплення в Autodesk Fusion 360

На рис. 2.13 після завершення моделювання, STL-файл був імпортований у слайсер Bambu Studio.



Slicing Result			
Колірна схема			
Філамент			
Філамент	Модель	Підтримки	Загальний
1	4,61 m	0,03 m	4,64 m
	11,53 g	0,07 g	11,60 g
Час зміни філаменту: 1			
Витрата: 0,29			
Оцінка часу			
Час підготовки: 8m12s			
Час друку моделі: 41m55s			
Загальний час: 50m8s			
Параметри		Відобразити	
<input type="checkbox"/>	Переміщення	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	Ретракт	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	Втягування	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	Протирання	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	Шви	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 2.13 – Слайсинг моделі кріплення у BambuStudio

Слайсинг — процес перетворення 3D-моделі на G-код для 3D-принтера. Ключові параметри нарізки були ретельно оптимізовані для забезпечення максимальної міцності деталі:

1) обрано ABS-пластик 3D Plast. ABS є ідеальним вибором для FPV-дронів завдяки його високій ударостійкості та термостійкості, що особливо важливо для деталі, розташованої близько до гарячого VTX;

2) висота шару була встановлена на 0.2мм для балансу між деталізацією та часом друку. Щільність заповнення Infill була встановлена на високому рівні понад 80% з використанням кубічного паттерна для забезпечення максимальної жорсткості та міцності на злам, що є критичним для елемента, який захищає комунікаційні системи;

3) друк здійснювався на високошвидкісному 3D-принтері Bambu Lab X1 Carbon, який використовує закриту камеру та активний контроль температури. Це мінімізувало деформацію ABS-пластику та забезпечило високу точність розмірів.

На рис. 2.14 та 2.15 зображена отримана 3D-друкована деталь, яка була встановлена на раму. Вона забезпечує необхідну жорсткість, захищає RX-приймач та VTX від механічних пошкоджень, а також гарантує коректне розташування антени VTX та вертикальне рознесення антени ELRS, що є необхідною умовою для стабільного далекобійного зв'язку [12].

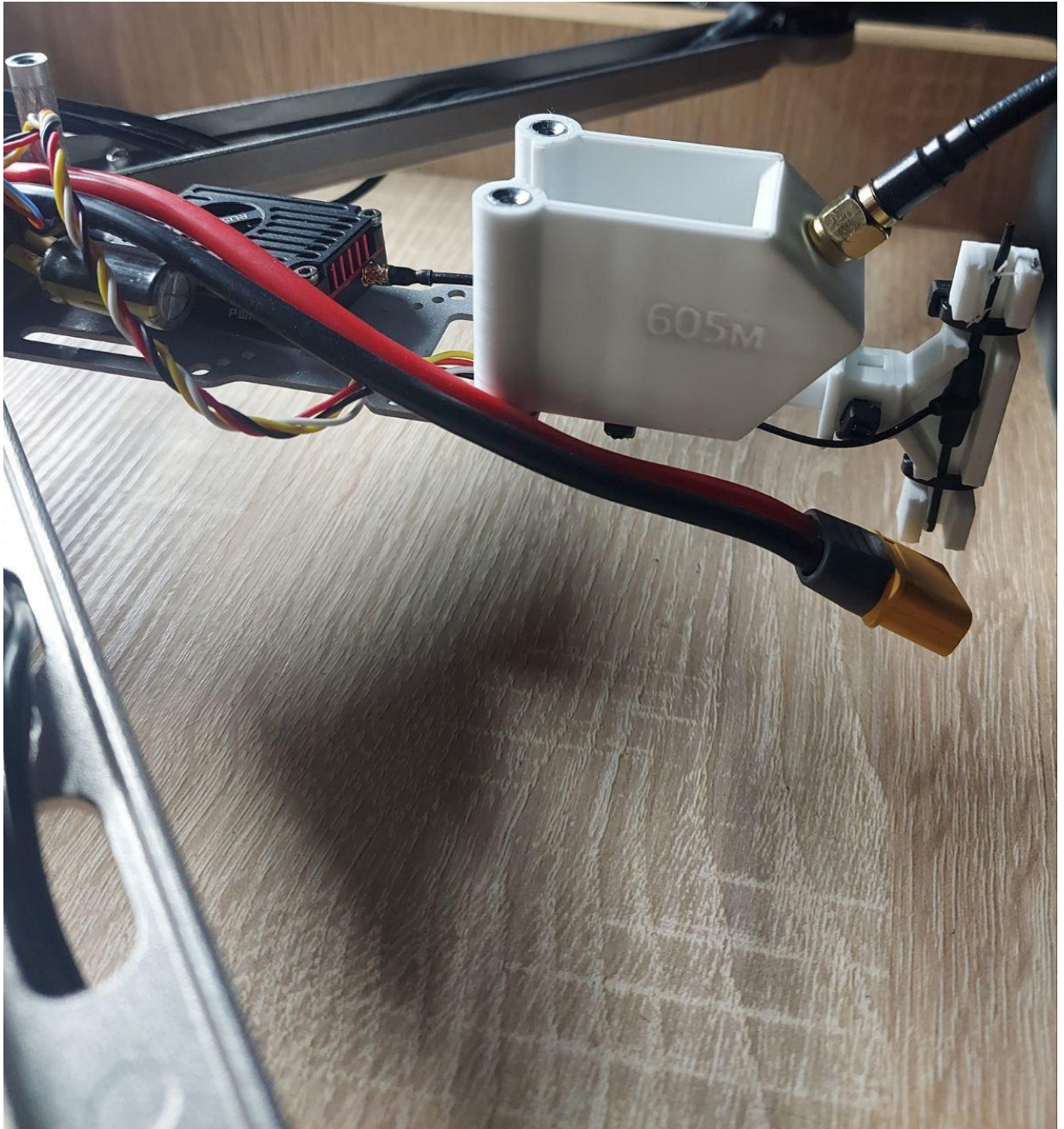


Рисунок 2.14 – Встановлена 3D-деталь

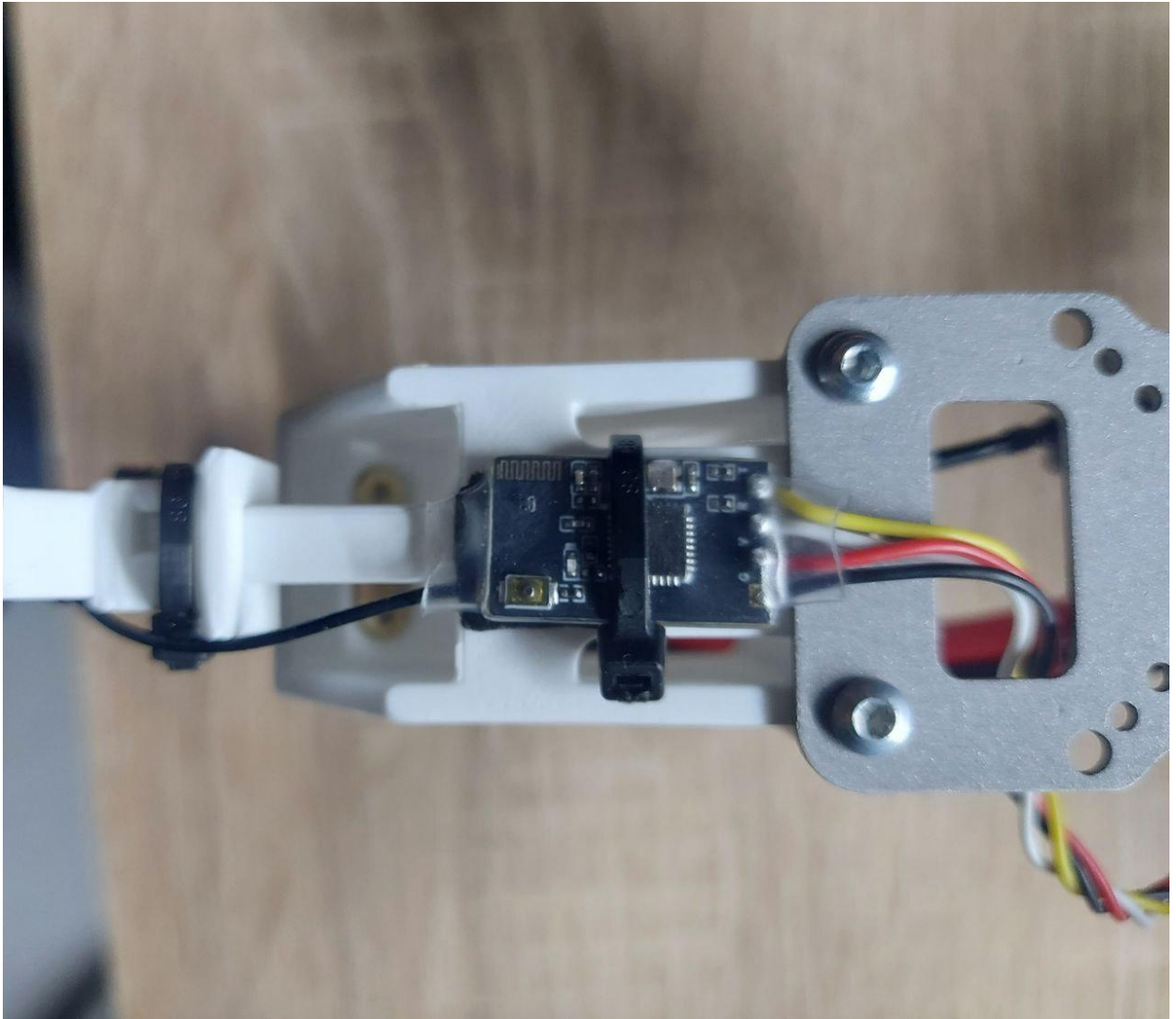


Рисунок 2.15 – Встановлення приймача ERLS

Таким чином, індивідуальне 3D-моделювання та друк дозволили створити захисний елемент, який відповідає суворим вимогам FPV-логістики щодо механічної міцності та оптимізації радіочастотних характеристик.

На рис. 2.16 був змодельований фіксатор антени ELRS. Цей елемент має компакту конструкцію, що «надягається» на виступаючу штангу хвостового кріплення.

Модель фіксатора складається з двох основних частин: посадкового місця, яке ковзає на штангу основного кріплення, та двох симетричних пазів для утримання вуса (диполя) антени ELRS.

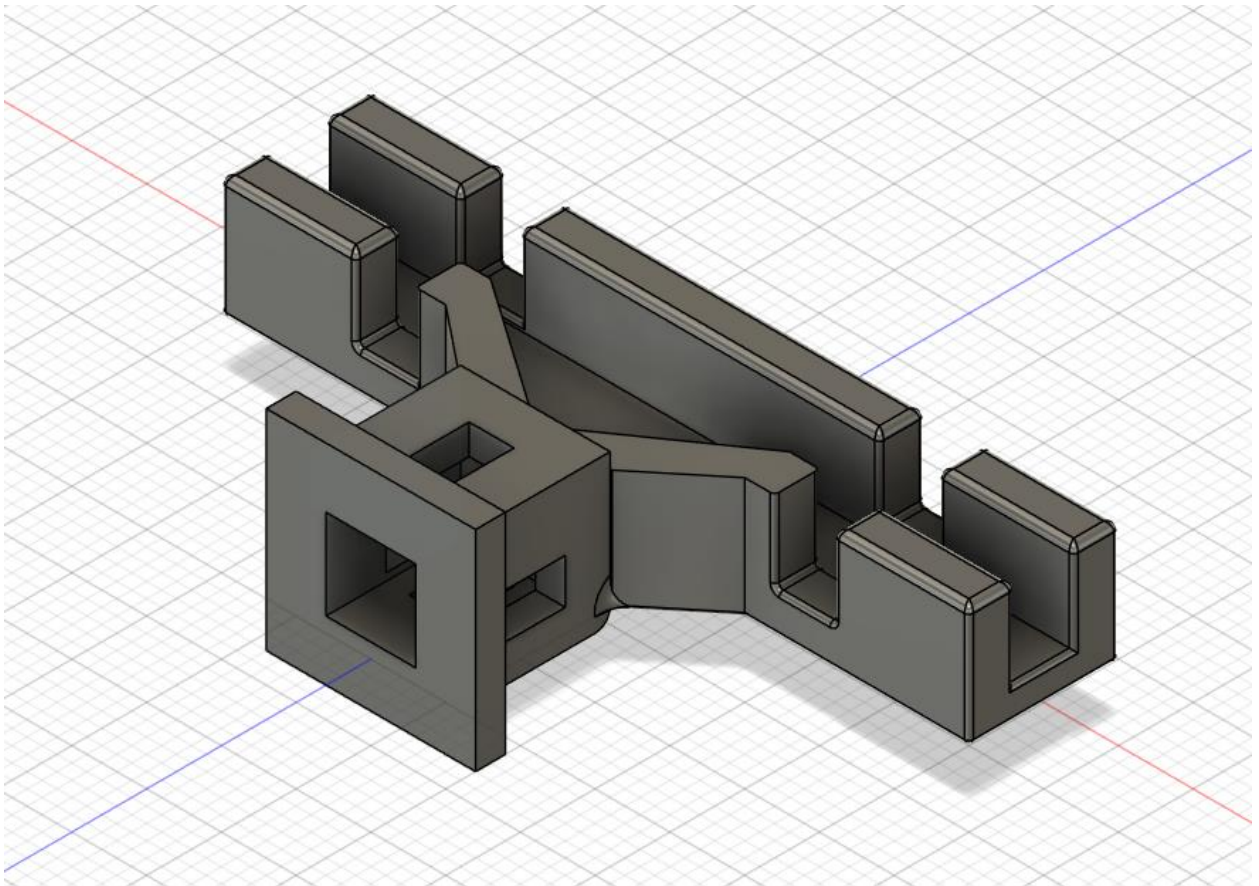


Рисунок 2.16 – Фіксатор антени радіокерування

Після того, як антена вставляється у пази фіксатора, він надівається на стрижень кріплення. Для забезпечення надійної, нерухомої фіксації антени в одному положенні застосовуються дві тонкі кабельні стяжки. Стяжки пропускаються через спеціально передбачені канали у фіксаторі та щільно затягуються навколо вусів антени та стрижня кріплення. Це запобігає будь-якому зміщенню антени, що є критично важливим, оскільки навіть невеликий рух може вплинути на поляризацію та, відповідно, на якість сигналу та дальність зв'язку.

Таким чином, індивідуальне 3D-моделювання та друк дозволили створити захисний елемент, який відповідає суворим вимогам FPV-логістики щодо механічної міцності та оптимізації радіочастотних характеристик.

2.2.2 Розробка 3D-моделі кріплення сервоприводу для вертикального нахилу FPV-камери.

Індивідуальне кріплення сервоприводу для FPV-камери є критично важливим для реалізації функціональної вимоги щодо динамічного керування кутом огляду. Це підвищує точність прицілювання під час гуманітарної доставки.

На рис. 2.17 був змодельований кронштейн в Autodesk Fusion 360. Основними конструктивними вимогами були мінімальна вага, максимальна жорсткість та надійне утримання сервоприводу та FPV-камери.

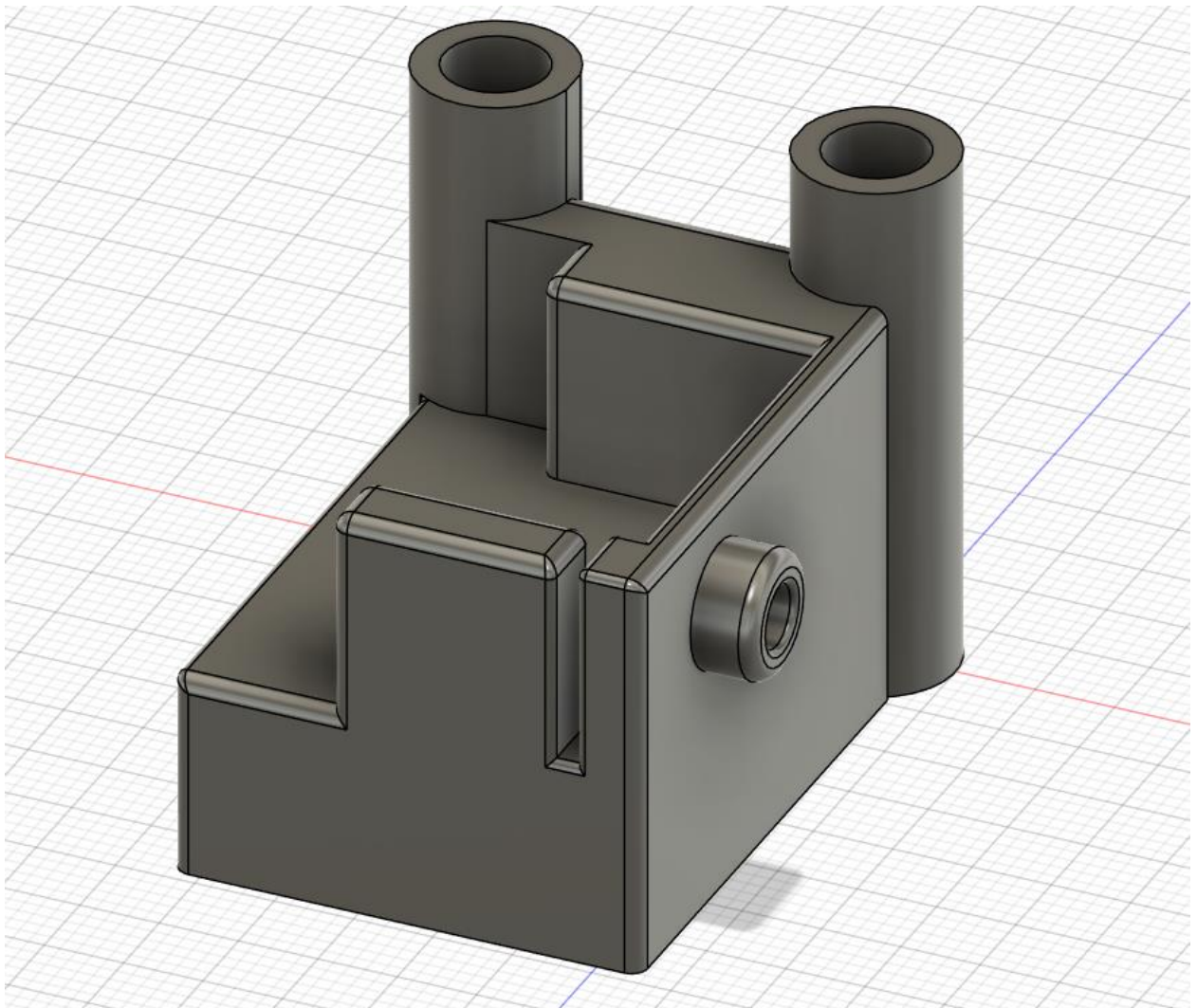


Рисунок 2.17 – Кронштейн сервоприводу SG90

Кронштейн спроектовано таким чином, щоб забезпечити точну фіксацію мікросервоприводу SG90 без люфтів. Корпус SG90 щільно входить у

спеціально спроектовану нішу. Для додаткової надійності та запобігання зміщенню сервоприводу під впливом вібрації та інерційних навантажень, передбачено два кріпильні отвори. Ці отвори призначені для фіксації корпусу сервоприводу на корпусі кронштейна за допомогою двох саморізів . Це гарантує, що сервопривід залишиться нерухомим протягом усього польоту, а його вісь обертання буде стабільною.

Основною інженерною задачею було створення надійного та легкозмінного вузла кріплення камери до рога сервоприводу. З цією метою на рис. 2.18 у верхній частині кронштейна, яка контактує з камерою, було реалізовано наступне:

Отвір для заводського саморіза В одній точці кріплення було передбачено посадковий отвір, який ідеально відповідає діаметру заводського саморіза сервопривода. Цей саморіз використовується для базової фіксації кріплення камери до кронштейна.

Інтеграція латунної втулки М3. З протилежного боку, для створення надійного різьбового з'єднання та запобігання пошкодженню пластику під час затягування, було спроектовано отвір для впавної латунної втулки М3. Ця втулка, нагріта до температури 180-200 °С, вплавляється у пластик, створюючи міцне металеве різьбове з'єднання. Це забезпечує надійну фіксацію кріплення камери гвинтом М3 з іншого боку, що критично важливо для жорсткості вузла, який постійно піддається динамічному нахилу.

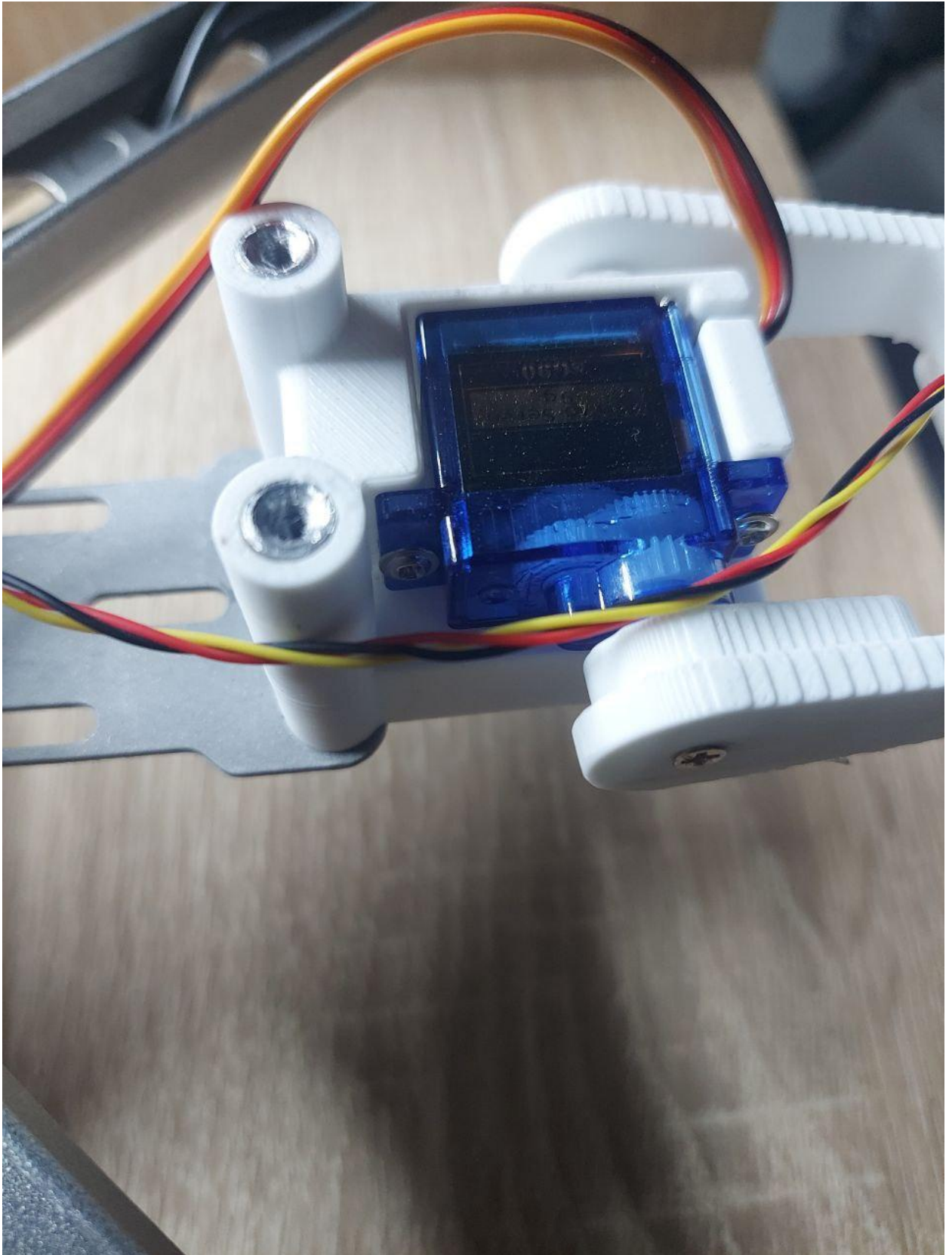


Рисунок 2.18 – Кріплення сервоприводу

На рис. 2.19, як і для хвостового кріплення, даний кронштейн друкувався з ABS-пластику на принтері Bambu Lab X1 Carbon. Висока жорсткість ABS

забезпечує точність механізму та мінімізує люфти. Кронштейн інтегрується з рамою за допомогою стандартних гвинтів та силіконових прокладок для ізоляції від вібрації.

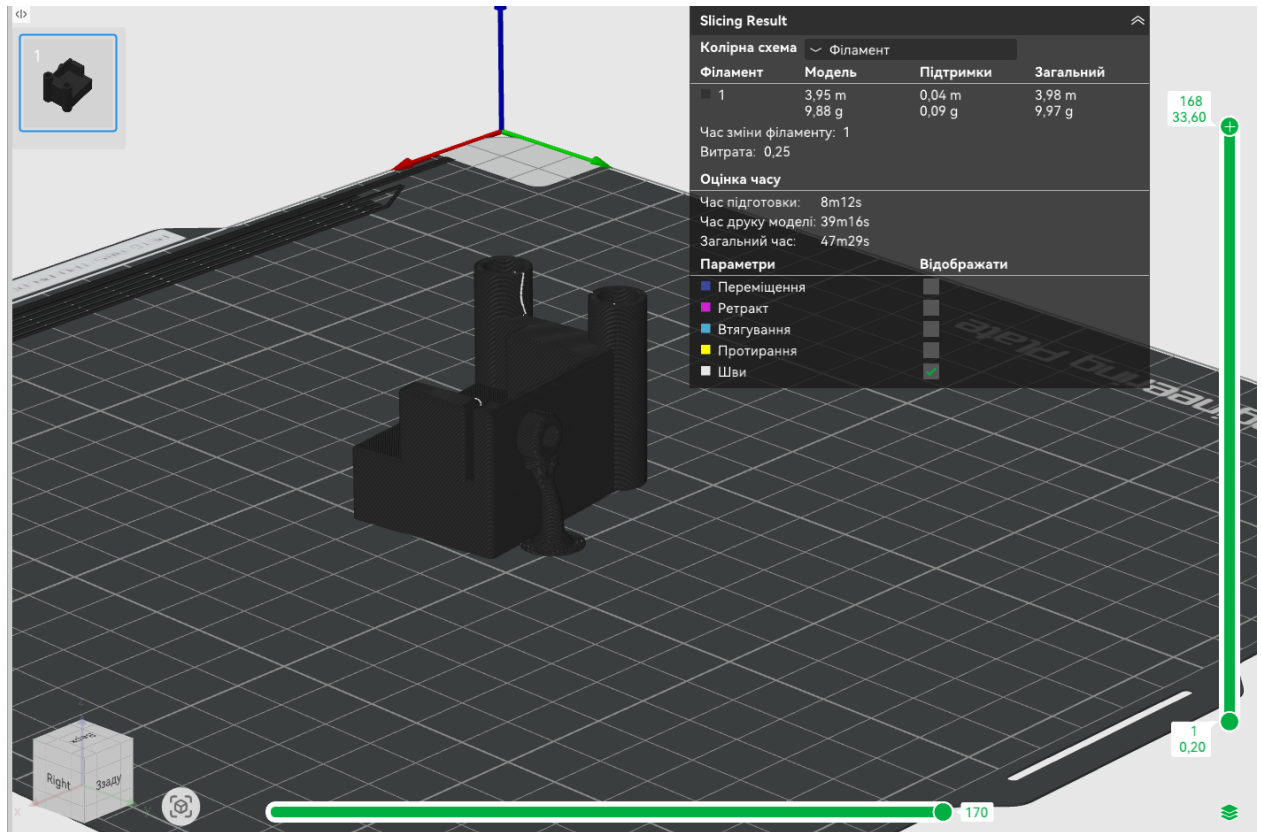


Рисунок 2.19 – Слайсинг кріплення сервоприводу

Реалізація цієї конструкції дозволила створити надійний, легкий та ремонтпридатний вузол, який готовий до програмної інтеграції з Betaflight для пропорційного керування нахилом FPV-камери.

2.2.3 Проктування гімбалу FPV-камери та його з'єднання з сервомеханізмом

На рис. 2.20 зображена модель гімбалу камери є рухомою частиною механізму нахилу, яка безпосередньо утримує FPV-камеру Foxeer Razer Mini V3 та передає їй обертальний рух від сервоприводу. Його конструкція має забезпечувати жорсткість з'єднання та швидкий доступ до камери [20].

Гімбал спроектований як подвійна симетрична «вилка», що надійно охоплює камеру Foxeer Razer Mini V3. Це рішення було обрано для забезпечення рівномірного розподілу навантаження та мінімізації механічних деформацій. Гімбал спроектовано із точним внутрішнім пазом, що ідеально відповідає розмірам корпусу FPV-камери. Камера вставляється у цей паз і фіксується двома гвинтами M2 по боках, забезпечуючи нульовий люфт [15].

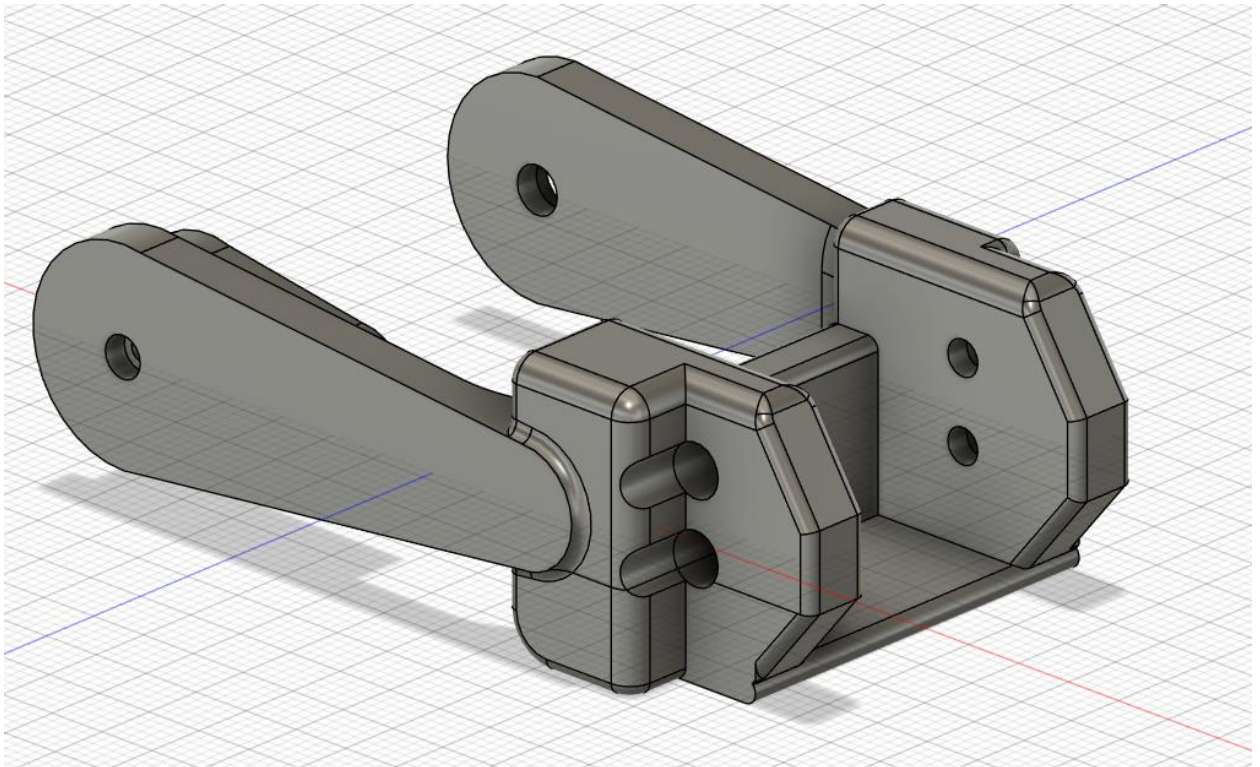


Рисунок 2.20 – Кріплення камери

Основною інженерною задачею було створення надійного та легкозмінного вузла кріплення. З цією метою на рис. 2.21 у вузлі було реалізовано наступне:

1) в одній точці кріплення було передбачено посадковий отвір, який ідеально відповідає діаметру заводського саморіза FPV-камери. Цей саморіз використовується для базової фіксації камери до кронштейна;

2) з протилежного боку, для створення надійного різьбового з'єднання та запобігання пошкодженню пластику під час затягування, було спроектовано отвір для впавної латунної втулки M3.

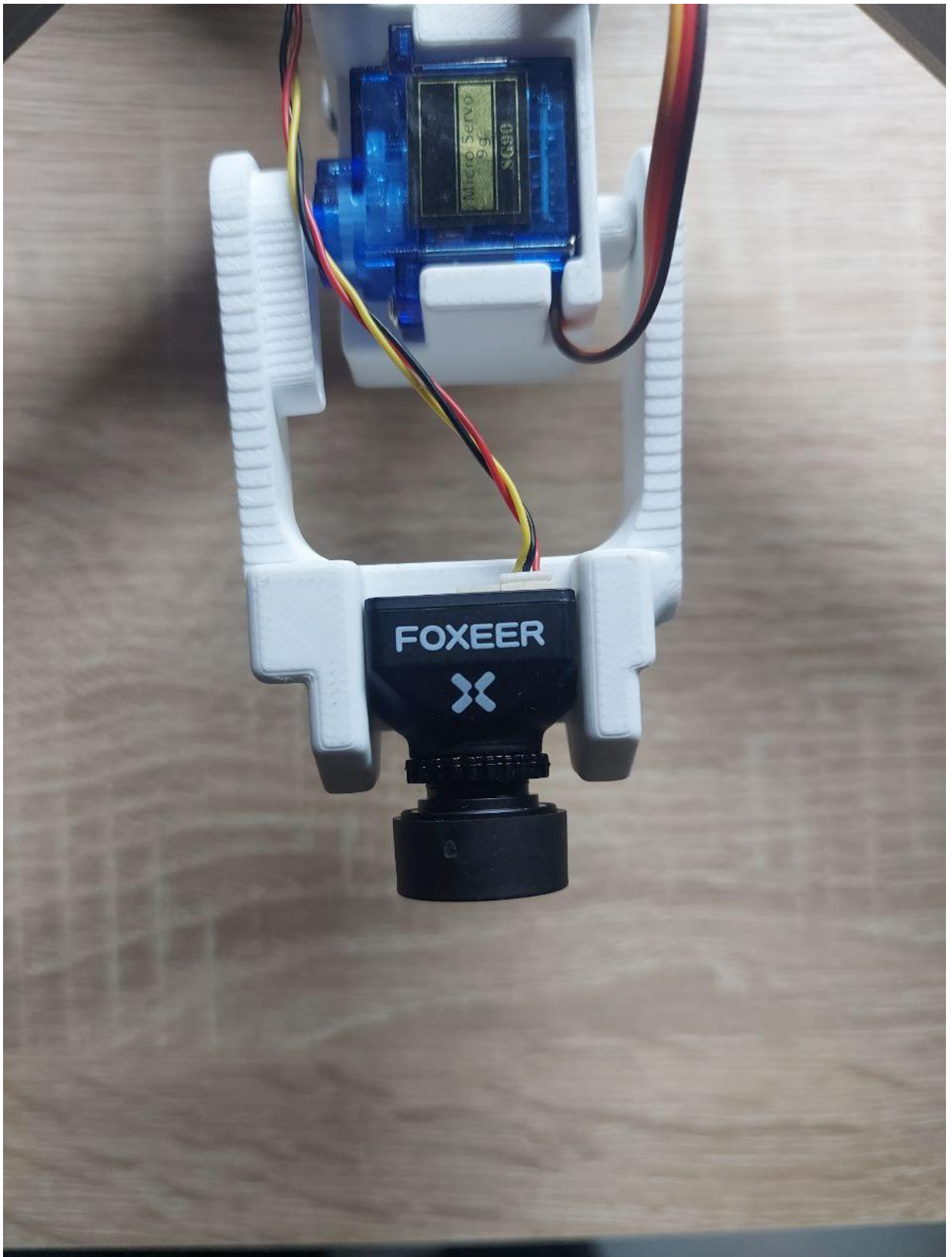


Рисунок 2.21 – Механічне кріплення камери

На рис. 2.22 та 2.23 важелі гімбалу мають круглі отвори, які слугують для з'єднання з рогом сервоприводу SG90. Цей рог, закріплений на осі

сервоприводу, механічно з'єднується з кронштейном, перетворюючи обертальний рух сервоприводу на точний вертикальний нахил камери, вісь Pitch.

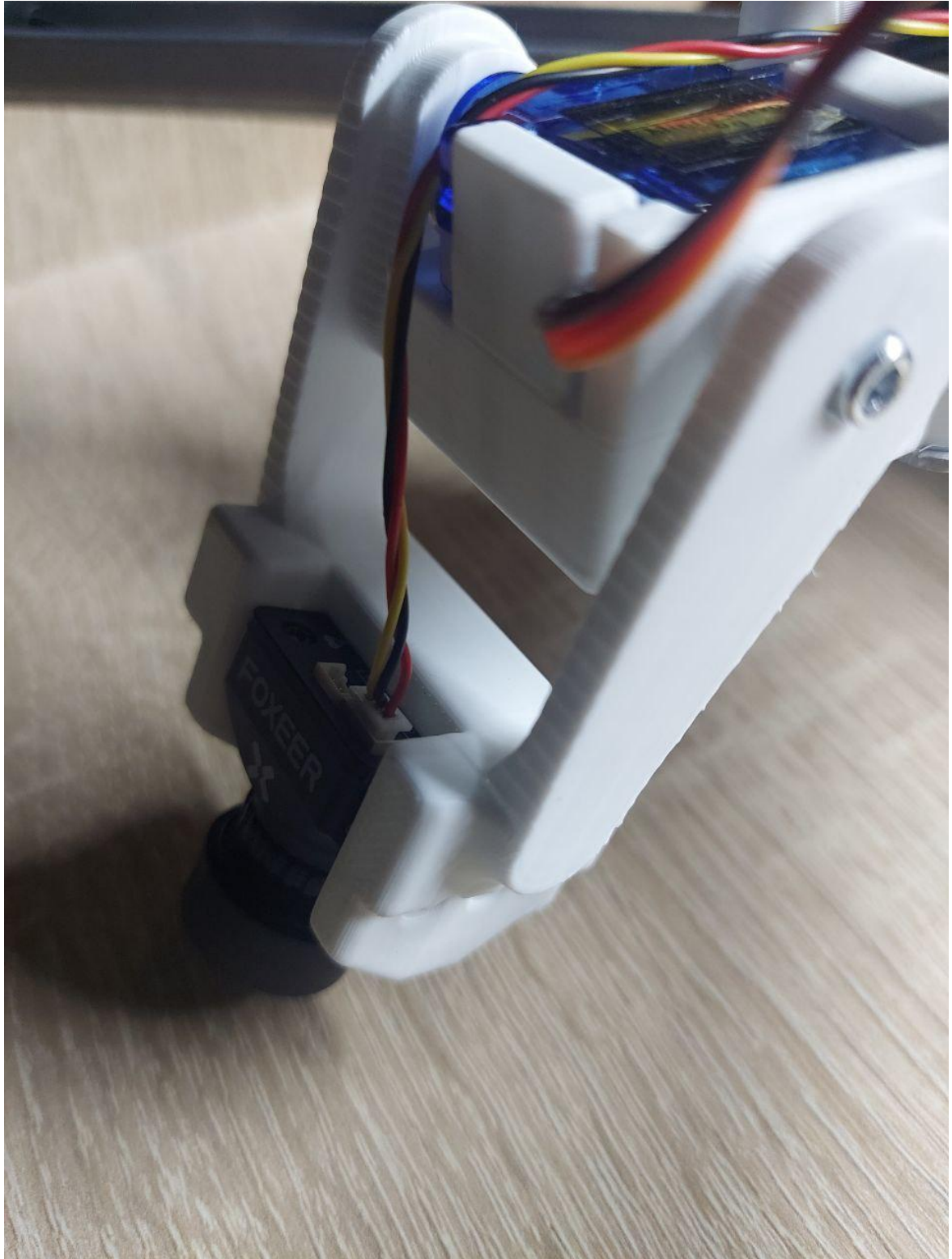


Рисунок 2.22 – Нахил камери вниз

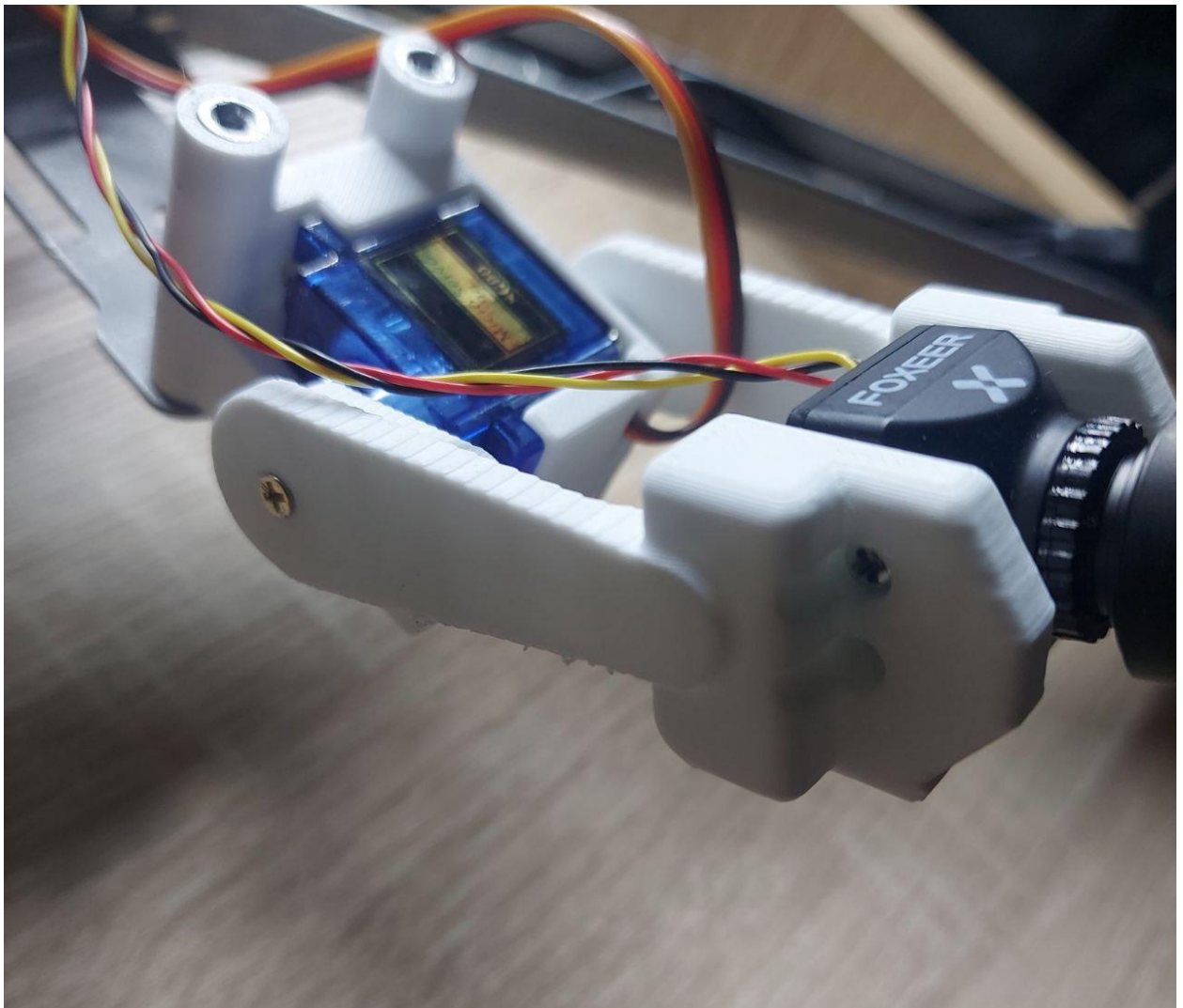


Рисунок 2.23 – Нахил камери вгору

Обидві частини механізму нахилу друкувалися з ABS-пластику. Висока жорсткість та термостійкість ABS-пластику гарантують, що динамічне керування камерою буде виконуватися без люфтів та деформацій навіть при високих вібраційних навантаженнях.

2.2.4 Проектування компонентів механізму скиду гуманітарного вантажу

Розробка механізму скиду є другою ключовою інженерною задачею. На відміну від механізму камери, тут пріоритет надається вантажопідйомності та надійності дискретної фіксації. Механізм скиду складається з двох основних 3D-друкованих частин: основної бази, яка кріпиться до рами, та рухомого гака.

На рис. 2.24 зображена основна база, яка є корпусом, призначеним для монтажу та захисту потужного сервоприводу 20 кг та кріплення до рами БПЛА [17].

Для забезпечення надійної фіксації вантажу до 2 кг та швидкого, чіткого спрацювання обрано потужний сервопривід 20 кг. Його високий крутний момент гарантує, що гак не відкриється під впливом вібрації або інерції.

Усередині корпусу спроектовано точне посадкове місце. Сервопривід фіксується за допомогою гвинтів М3, які входять у бічні стінки бази. Це запобігає будь-якому його зміщенню під час польоту.

Корпус спроектований для кріплення до нижньої пластини рами за допомогою стандартних гвинтів.

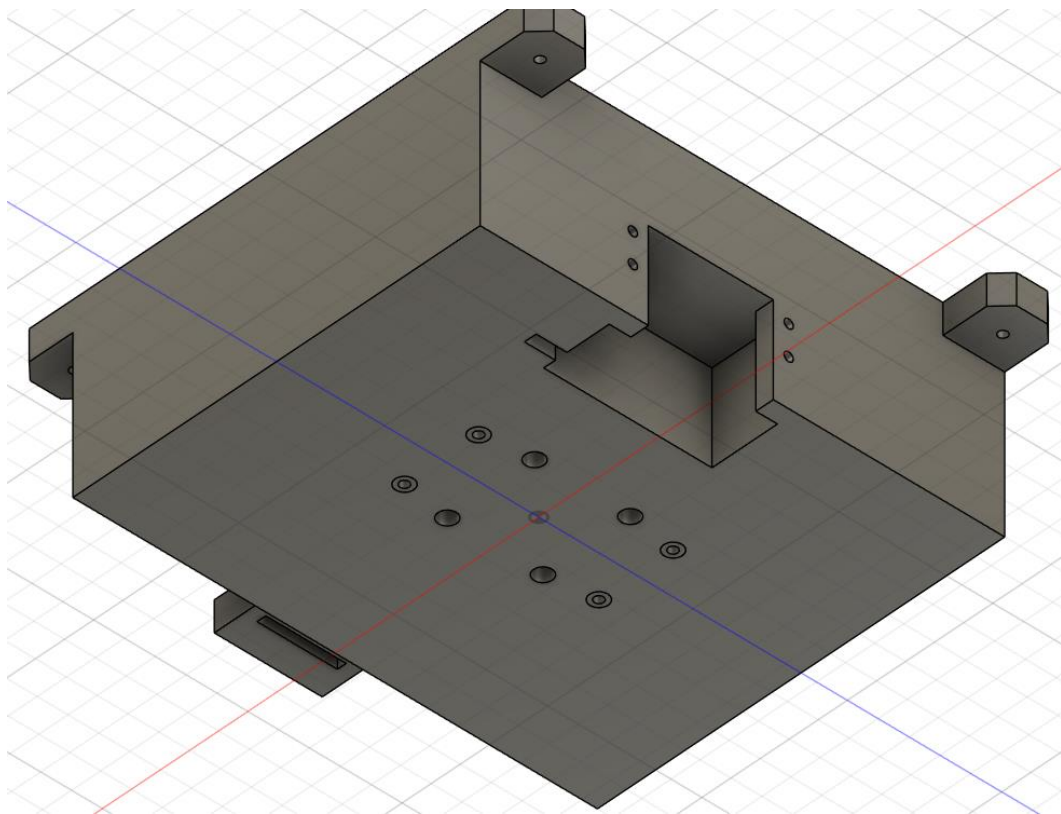


Рисунок 2.24 – Основна частина механізму скиду кріплення для серво

Однією з ключових вимог до гуманітарного скиду є універсальність кріплення. На рис. 2.25, замість складних кліпс або фіксаторів, було обрано систему, що базується на стрічці або ремені.

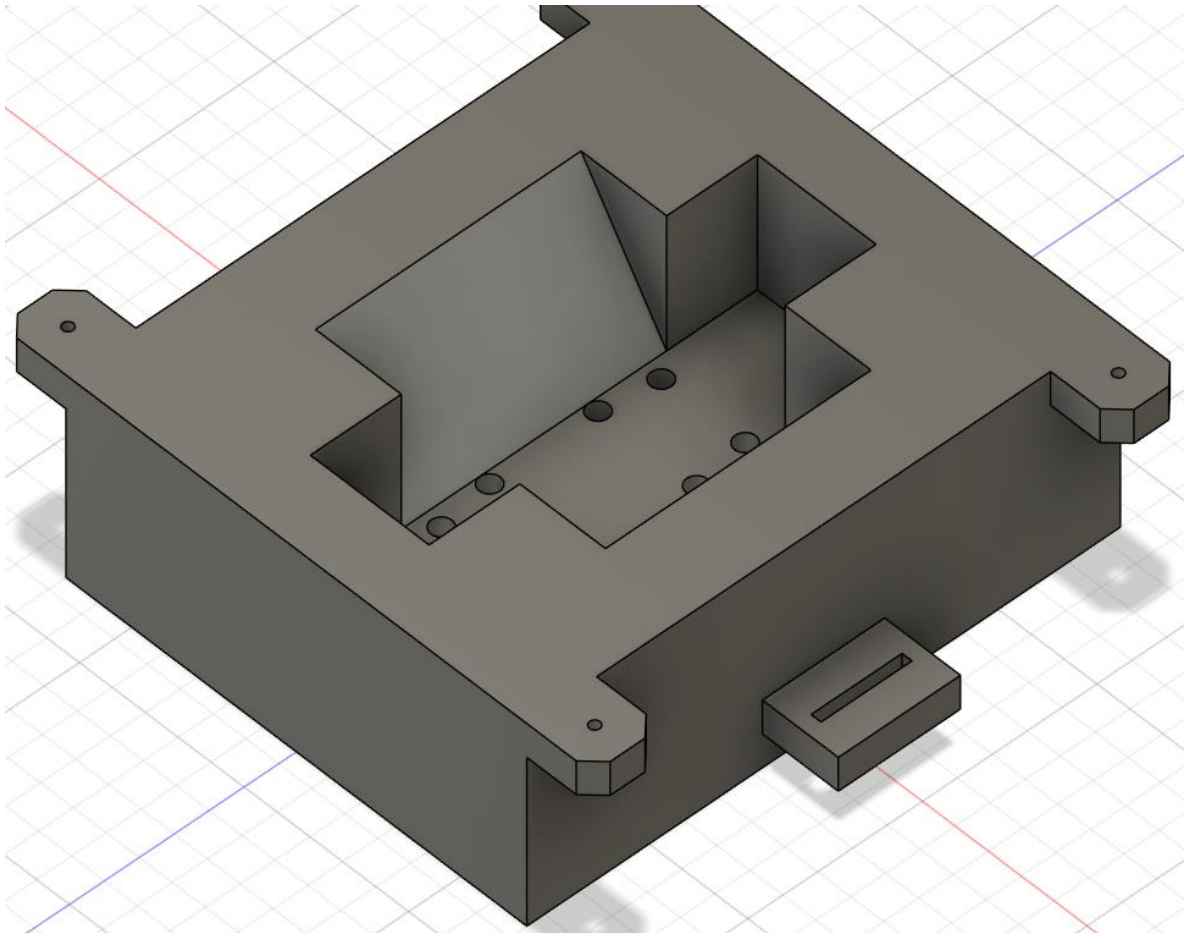


Рисунок 2.25 – Основна частина механізму скиду з кріпленням для фіксатора вантажу

У конструкції бази передбачено горизонтальні та вертикальні слоти, через які пропускається текстильний ремінь. Це дозволяє надійно обв'язати вантаж та під'єднати його до механізму скиду.

2.2.5 Модульна база скиду для швидкої зміни конфігурації

Для забезпечення максимальної гнучкості та можливості адаптації БПЛА до різних типів вантажів, на рис. 2.26 було розроблено модульну систему кріплення. Ця система дозволяє швидко замінювати весь механізм корисного навантаження, не розбираючи основну раму дрона.

Основна база скиду спроектована таким чином, що вона кріпиться до центральної пластини рами всього на чотири болти М3. Щоб встановити модульну платформу потрібно також демонтувати 4 болти та встановити іншу

платформу. Цей підхід забезпечує швидкий монтаж та демонтаж всього вузла [24].

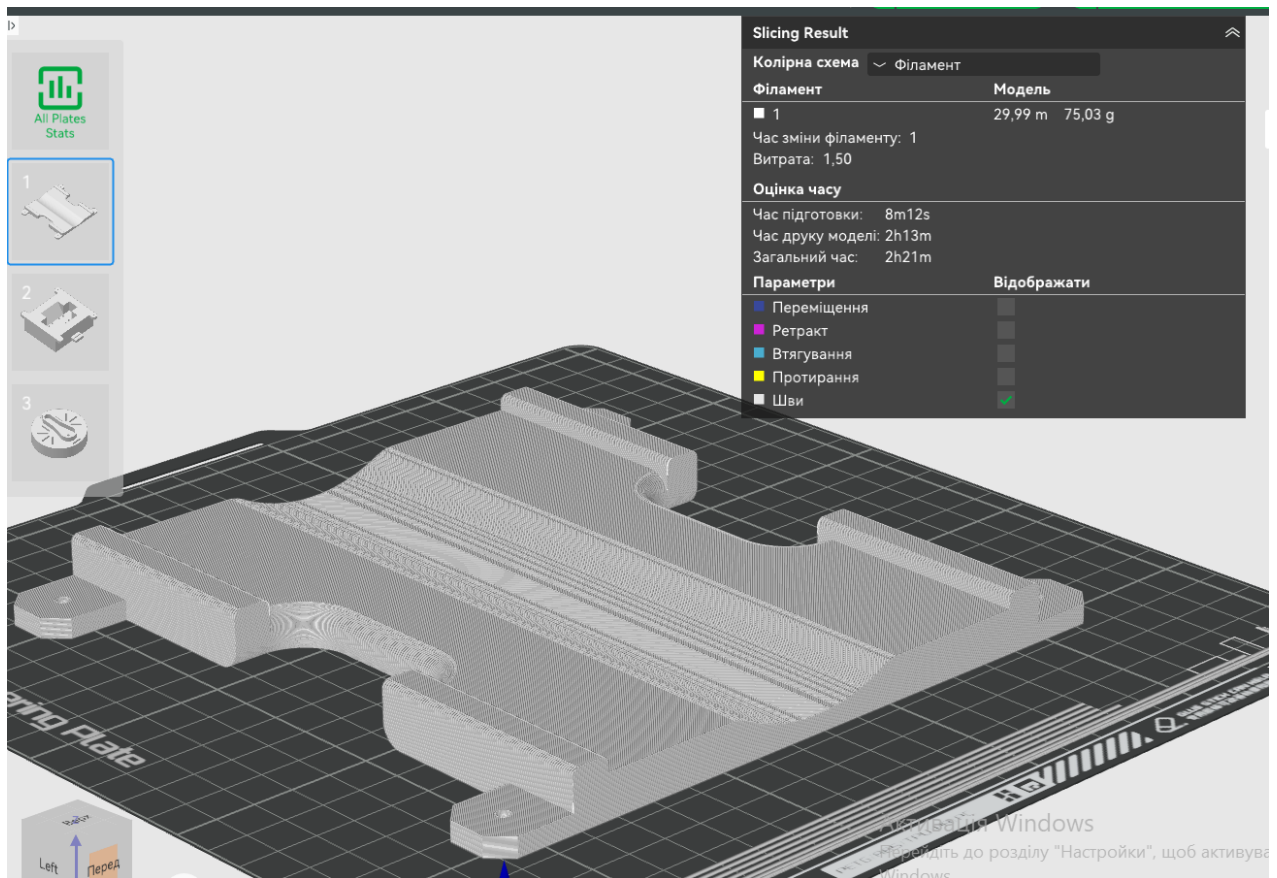


Рисунок 2.26 – Модульна платформа під різні типи вантажу

Таким чином, інженерна архітектура платформи відповідає вимозі максимальної гнучкості та модульності, що підвищує цінність БПЛА для різноманітних гуманітарних місій.

2.2.6 Проектування рухомого механізму скиду

Рухомий механізм є виконавчим елементом, який безпосередньо здійснює звільнення вантажу. Ця модель має бути максимально надійною у зафіксованому положенні та мати мінімальний опір повітря у польоті.

На рис. 2.27 зображена модель дискового механізму, яка спроектована як дисковий елемент з ексцентричною робочою частиною. Це забезпечує максимальну механічну міцність при мінімальній вазі та інерції.

Диск має центральний отвір, що точно відповідає осі сервоприводу. Для запобігання прокручуванню дисковий елемент фіксується до рога сервоприводу за допомогою гвинта та має зубчасту внутрішню поверхню.

На периферії диска спроектовано спеціальний слот у формі гака. У положенні 1000 гак щільно замикає пряжку ременя. У положенні 2000 сервопривід повертає диск на 180° звільняючи петлю, в яку заведена пряжка вантажного ременя.



Рисунок 2.27 – Модель дискового механізму скиду вантажа

Система працює за принципом розриву петлі. Ремінь, яким обв'язаний гуманітарний вантаж, має на кінці металеву пряжку, яка замикається у спеціально створеному слоті дискового механізму.

Команда з AUX5 ініціює поворот диска. Ексцентричний гак обертається, відкриваючи слот і звільняючи пряжку ременя, таким чином миттєво скидаючи вантаж. Чітке дискретне керування запобігає випадковому або частковому звільненню вантажу.

2.3 Висновок до розділу 2

У розділі 2 було успішно завершено етап проектування та апаратної інтеграції БПЛА, що повністю відповідає усім вимогам, сформульованим у розділі 1. Інженерні роботи були зосереджені на створенні надійної, високопродуктивної та модульної платформи. У ході виконання цього розділу було здійснено:

- 1) повна підготовка та збірка основних компонентів, включаючи паяння силових дротів до ESC;
- 2) модифікацію конденсатора для мінімізації індуктивності та забезпечення стабільного живлення;
- 3) детально розроблено електричну схему підключення польотного контролера Speedybee F405 V3, де визначено порти UART6 та UART1, що забезпечує коректну комунікацію всіх систем.

Ключовим досягненням стала розробка унікальних 3D-друкованих модулів для реалізації спеціалізованого функціоналу. Були спроектовані та виготовлені:

- 1) механізм нахилу FPV-камери, який складається з бази під сервопривід SG90 та кронштейна камери;
- 2) спроектована основна база під потужний сервопривід 20 кг та рухомий дисковий гак. Система кріпиться до рами всього на чотири болти М3, що забезпечує швидку зміну модулів та високу універсальність платформи;
- 3) створено захисний елемент з ABS-пластику для VTX та RX, що забезпечує оптимальне положення антен для максимальної дальності зв'язку.

Усі механічні елементи були змодельовані в Autodesk Fusion 360 та виготовлені методом 3D-друку з високоміцного ABS-пластику.

3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА КОНФІГУРАЦІЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМИ

На етапі апаратної інтеграції було успішно завершено фізичну збірку платформи, включаючи встановлення польотного стека Speedybee F405 V3 та інтеграцію всіх периферійних пристроїв, зокрема, спеціалізованих сервоприводів, підключених до невикористовуваних моторних виводів M5 та M8. Метою розділу «Апаратно-програмна конфігурація та інтеграція системи» є програмне «оживлення» апаратної частини шляхом встановлення та тонкої конфігурації відкритого програмного забезпечення Betaflight. Цей етап є критично важливим, оскільки саме гнучкість Betaflight дозволяє подолати обмеження комерційних дронів та реалізувати унікальний функціонал – пропорційне керування нахилом камери та дискретне керування механізмом скиду, що є основою гуманітарної місії.

Цей розділ детально описує послідовність налаштування апаратно-програмного комплексу. Робота включає прошивання мікроконтролера ПК за допомогою Betaflight Configurator, забезпечення високошвидкісного каналу зв'язку шляхом оновлення прошивки приймача ExpressLRS через спеціалізований ELRS Configurator, а також детальну конфігурацію портів UART1 (VTX SmartAudio) та UART6 (RX CRSF). Ключова увага приділяється програмному перепризначенню ресурсів, Resource Remapping, у командному рядку Betaflight CLI для активації виводів M5 та M8 як виходів PWM, що дозволить керувати корисним навантаженням та забезпечить стабільність польоту, згідно з нефункціональними вимогами щодо продуктивності та низької затримки.

3.1 Прошивання польотного контролера через Betaflight Configurator

Процес прошивання ПК є першим та найбільш відповідальним етапом, що закладає основу для коректної роботи всіх систем БПЛА. Для ПК

Speedybee F405 V3 використовується відкрита прошивка Betaflight та спеціалізований графічний інтерфейс Betaflight Configurator [21].

Підключивши ПК до комп'ютера у режимі DFU, необхідно ідентифікувати та обрати цільову плату (target). На рис. 3.1 зображено відповідна цільова плата, яка має назву SPEEDYBEEF405V3. Вибір коректної версії прошивки є критичним для забезпечення сумісності з апаратними компонентами, зокрема з мікроконтролером STM32F405, та підтримки функціоналу. Була обрана стабільна версія прошивки 4.5.2 (від 19-Mar-2025).

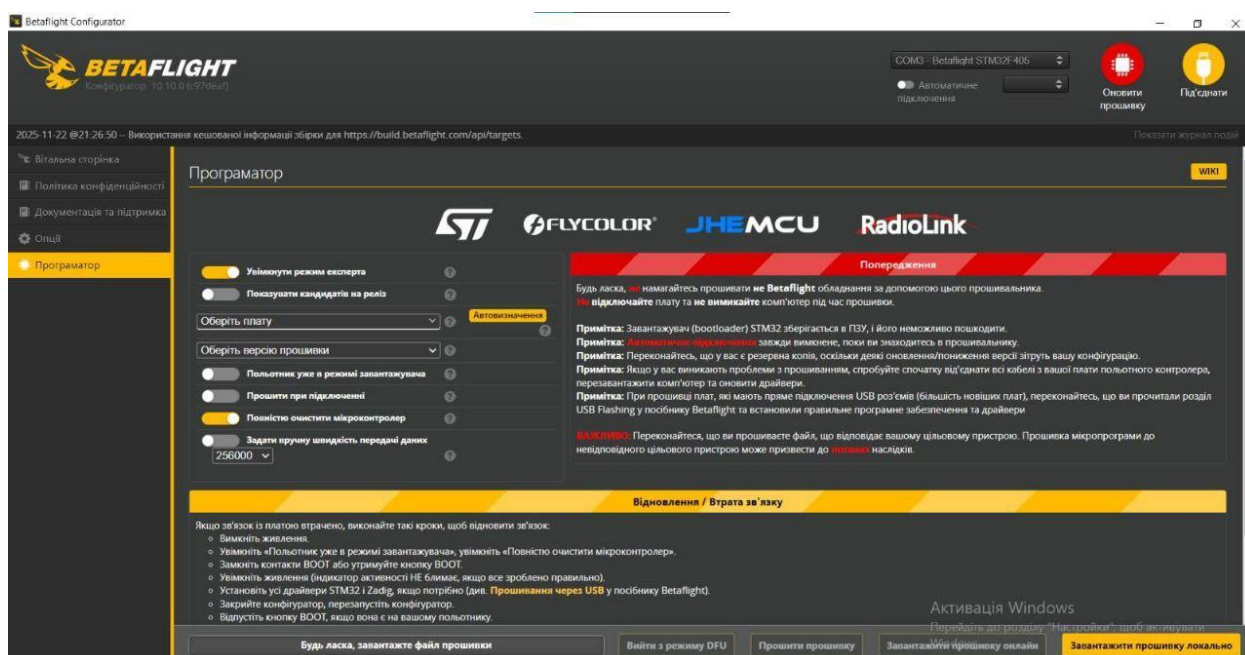


Рисунок 3.1 – Меню оновлення прошивки на ПК

Оскільки мікроконтролер STM32F405 має обмежену пам'ять порівняно з F7, оптимізація прошивки шляхом включення лише необхідних функцій дозволяє зберегти ресурс МК та забезпечити високу продуктивність. На рис. 3.2 для цілей даної роботи були обрані наступні ключові функції, які мають бути обов'язково включені до збірки:

1) OSD: Критично необхідна функція для накладання телеметричних даних на аналоговий відеосигнал, що є нефункціональною вимогою до безпеки польоту;

- 2) Servos: Найважливіша функція для даного проєкту. Її активація забезпечує підтримку керування сервоприводами через PWM-виходи, що є основою для реалізації механізму нахилу камери та механізму скиду вантажу;
- 3) VTX: Ця функція необхідна для програмної підтримки протоколу SmartAudio, що дозволяє пілоту дистанційно керувати потужністю та каналом VTX;
- 4) GPS: Хоча дрон буде керуватися вручну, активація GPS-функціоналу є необхідною для потенційного використання режиму Rescue Mode (FailSafe), що підвищує шанси на повернення дрона у разі втрати зв'язку;
- 5) Telemetry: Необхідна для отримання даних телеметрії від приймача ELRS та передачі їх на апаратуру керування.

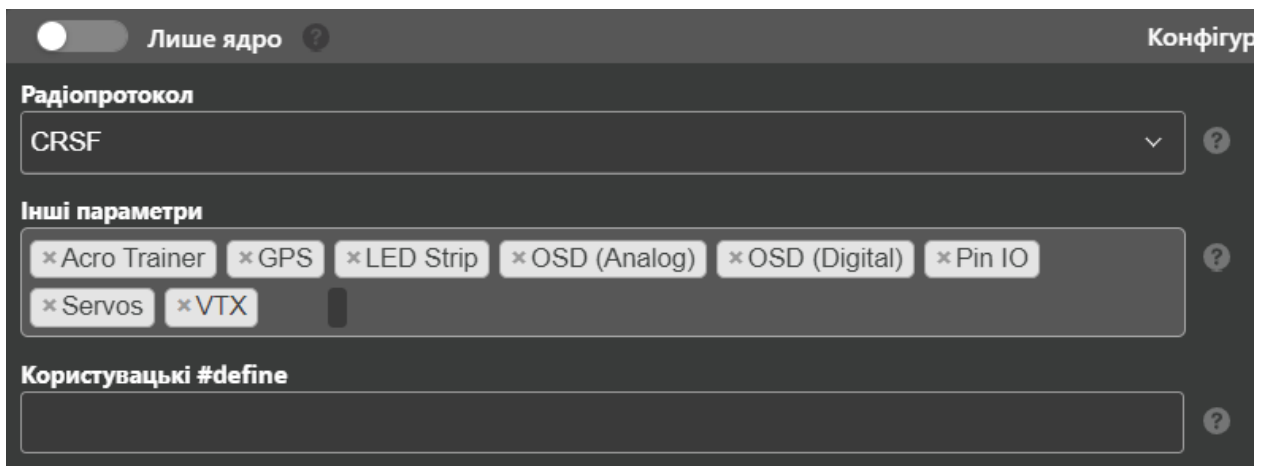


Рисунок 3.2 – Параметри збірки

Прошивання виконується через Betaflight Configurator. При цьому обов'язково активується опція «Повністю очистити мікроконтролер» для видалення будь-яких старих налаштувань, що могли б спричинити конфлікти або нестабільність роботи. Після завантаження прошивки в пам'ять ПК, виконується фінальна перевірка, яка підтверджує успішне прошивання та версію [22].

На рис. 3.3 зображено успішне завершення цього етапу.

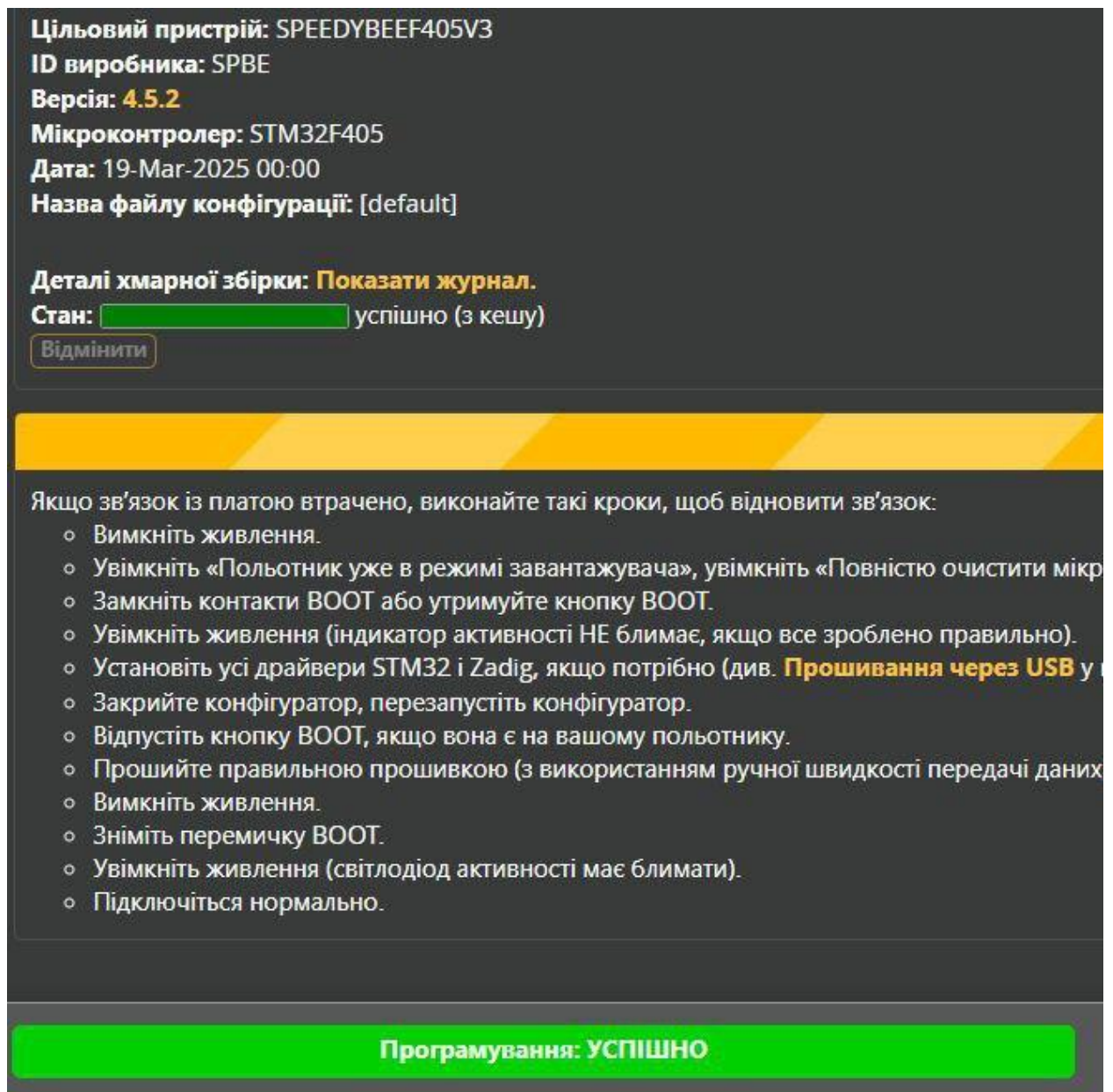


Рисунок 3.3 – Успішне прошивання ПК

3.1.1 Калібрування акселерометра та базове налаштування

Калібрування акселерометра є фундаментальною вимогою для коректної роботи всіх стабілізованих режимів польоту (Angle, Horizon), які можуть бути використані пілотом-початківцем або під час зависання для точного скиду вантажу. Без правильного калібрування акселерометра польотний контролер не може точно визначити, де знаходиться «горизонт», що призводить до некоректного вирівнювання дрона.

Калібрування здійснюється у розділі «Налаштування».

Перед початком калібрування дрон повинен бути розміщений на ідеально рівній, горизонтальній поверхні. Важливо, щоб ПК, встановлений на рамі, був повністю нерухомий. Будь-який рух під час цього процесу призведе до помилкових показань.

У розділі «Налаштування» натискається кнопка «Калібрувати акселерометр». ПК реєструє виміряні значення гравітації та встановлює їх як нульові зміщення.

Після калібрування пілот повинен візуально перевірити показання на 3D-моделі дрона, що відображається у Configurator.

Для забезпечення максимальної стабільності польоту 10-дюймового БПЛА, особливо під час перенесення вантажу, недостатньо лише графічного калібрування. Необхідне точне налаштування фільтрів гіроскопа та акселерометра через інтерфейс командного рядка для ефективного приглушення вібрацій, що генеруються великими пропелерами та потужними моторами 3115.

Нижче на рис. 3.4 наведено блок CLI-команд, що визначає параметри фільтрації та сенсорів:

```
# master
set gyro_hardware_lpf = NORMAL
set gyro_lpf1_type = PT1
set gyro_lpf1_static_hz = 250
set gyro_lpf2_type = PT1
set gyro_lpf2_static_hz = 500
set gyro_notch1_hz = 0
set gyro_notch1_cutoff = 0
set gyro_notch2_hz = 0
set gyro_notch2_cutoff = 0
set gyro_calib_duration = 125
set gyro_calib_noise_limit = 48
set gyro_offset_yaw = 0
set gyro_overflow_detect = ALL
set yaw_spin_recovery = AUTO
set yaw_spin_threshold = 1950
set gyro_to_use = FIRST
set dyn_notch_count = 3
set dyn_notch_q = 300
set dyn_notch_min_hz = 100
set dyn_notch_max_hz = 600
set gyro_lpf1_dyn_min_hz = 250
set gyro_lpf1_dyn_max_hz = 500
set gyro_lpf1_dyn_expo = 5
set gyro_filter_debug_axis = ROLL
set acc_hardware = AUTO
set acc_lpf_hz = 25
set acc_trim_pitch = 0
set acc_trim_roll = 0
set acc_calibration = -70,-38,22,1
set baro_bustype = I2C
set baro_spi_device = 0
set baro_i2c_device = 2
set baro_i2c_address = 0
set baro_hardware = AUTO
```

Рисунок 3.4 – Параметри фільтрації та сенсорів

Параметри `gyro_lpf1_type = PT1` та `gyro_lpf2_type = PT1` з частотами 250Гц та 500Гц відповідно, встановлюють два послідовні фільтри низьких частот (Low-Pass Filters). Вони необхідні для приглушення високочастотного шуму, що надходить із гіроскопа.

Відключення статичних Notch-фільтрів (`gyro_notch1_hz = 0`, `gyro_notch2_hz = 0`) є стандартною практикою в нових версіях Betaflight, оскільки їхню функцію бере на себе більш ефективний Динамічний Notch-фільтр (DNF).

DNF автоматично ідентифікує та приглушує піки вібрації (гармоніки шуму), які змінюються залежно від обертів двигуна.

`dyn_notch_count = 3`: Активація трьох незалежних смуг приглушення шуму для забезпечення комплексного захисту.

`dyn_notch_min_hz = 100` та `dyn_notch_max_hz = 600`: Визначають робочий діапазон, у якому DNF шукатиме піки шуму. Встановлення мінімального порогу 100Гц допомагає уникнути приглушення критично важливих низьких частот управління.

`dyn_notch_q = 300`: Визначає якість (Q-фактор) або «ширину» фільтра. Значення 300 забезпечує вузьке та точне приглушення піка без впливу на сусідні частоти управління.

`acc_lpf_hz = 25`: Низькочастотний фільтр акселерометра встановлено на 25Гц. Це необхідно, оскільки акселерометр використовується переважно для низькочастотних обчислень (визначення горизонту, барометрична стабілізація), і більшість шуму повинна бути відфільтрована.

`acc_calibration = -70,-38,22,1`: Це збережені значення зміщення (offsets), отримані під час графічного калібрування акселерометра (п. 2.3), що забезпечує коректне визначення θ нахилу.

Блок команд `baro_...` для барометра визначає шину зв'язку (I2C) та апаратну ідентифікацію сенсора. Це необхідно для коректної роботи режиму стабілізації висоти (Altitude Hold), що є важливим для точного зависання під час скиду вантажу [13].

3.1.2 Налаштування портів

Налаштування портів є першим кроком після прошивання і відповідає за активацію комунікаційних каналів для всіх підключених периферійних пристроїв. Це забезпечує працездатність системи керування та передачі відео.

Процес налаштування здійснюється у розділі «Порти» Betaflight Configurator згідно з електричною схемою [14].

Встановлення Serial Rx на UART6 є обов'язковим для приймача ExpressLRS, який використовує протокол CRSF. Це забезпечує надійний та швидкий канал керування.

На UART1 дозволяє ПК передавати керуючі команди на відеопередавач, що є критичним для адаптивності дрона в польових умовах.

Baud Rate: Всі порти, що використовуються (UART1, UART6), налаштовуються на стандартну швидкість обміну даними 115200 бод, яка є достатньою для CRSF та SmartAudio.

На рис. 3.5 наданий блок коду керуючий налаштуванням портів.

```
# serial
serial 20 1 115200 57600 0 115200
serial 0 2048 115200 57600 0 115200
serial 1 0 115200 57600 0 115200
serial 2 0 115200 57600 0 115200
serial 3 0 115200 57600 0 115200
serial 4 1024 115200 57600 0 115200
serial 5 64 115200 57600 0 115200
```

Рисунок 3.5 – Налаштування серійних портів

Перший стовпець відповідає за номер UART порту від 1 до 6. Наступний стовпець описує серійні номери пристроїв. 2048 – це серійний номер протоколу SmartAudio. 64 – це серійний номер RX. Останні стовпці відповідають за швидкість передачі даних.

3.1.3 Активація функціоналу сервоприводів

Меню «Конфігурація» є центральним розділом Betaflight Configurator, де активується підтримка ключових апаратних функцій, які були включені під час прошивання ПК. Для даного проєкту, на рис. 3.6 зображена активація функціоналу, що стосується керування корисним навантаженням та підвищення стійкості, є пріоритетною.

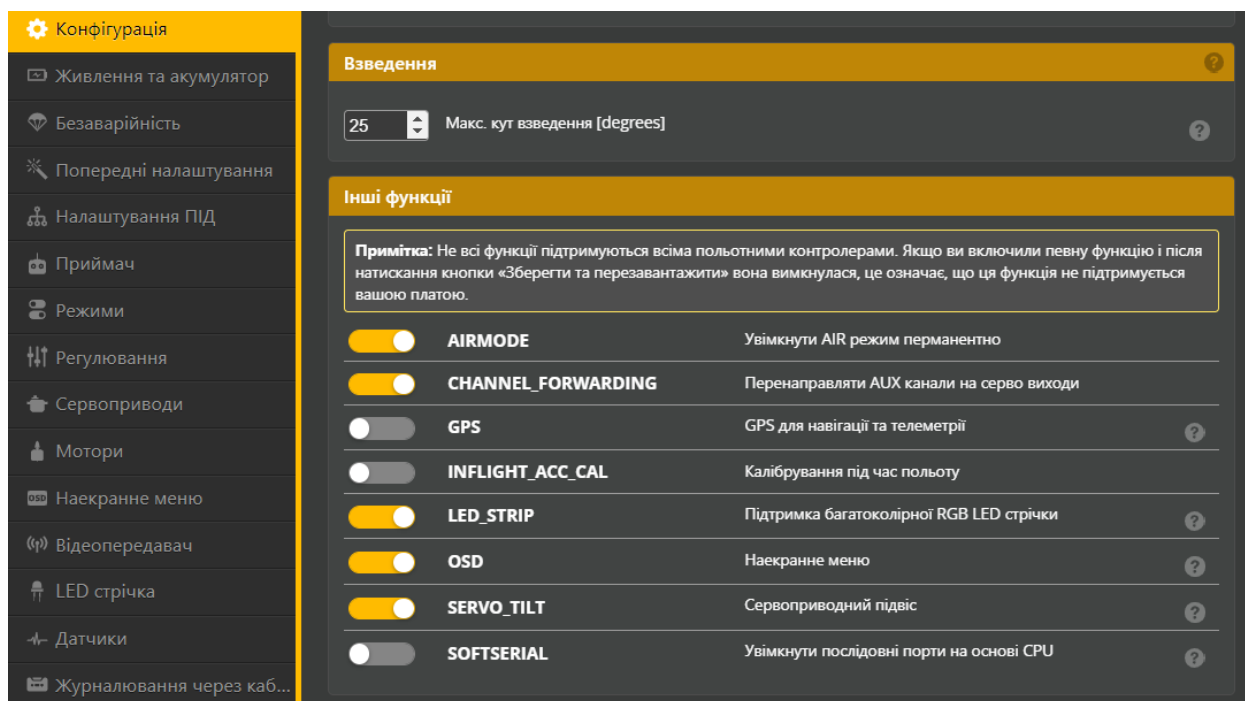


Рисунок 3.6 – Графічний вигляд увімкнених функцій

Ключові активовані функції для сервокерування:

1) SERVO_TILT:

- Ця функція є абсолютно необхідною для реалізації пропорційного керування нахилом FPV-камери. Активувавши SERVO_TILT, польотний контролер отримує можливість приймати команди з каналу AUX та перетворювати їх на PWM-сигнал для керування сервоприводом, після його програмного перепризначення у CLI. Це дозволяє пілоту динамічно змінювати кут огляду.

2) CHANNEL_FORWARDING:

- Ця функція дозволяє перенаправляти AUX-канали, що надходять від RC-приймача, безпосередньо на невикористані виходи двигунів, які були перепризначені на сервоприводи. Хоча ця функція може бути реалізована і через CLI (Resource Remapping), її активація у графічному інтерфейсі спрощує подальше призначення AUX-каналів у розділі «Сервоприводи».

3) OSD:

- Функція OSD забезпечує відображення телеметричних даних на відеосигналі. Це нефункціональна вимога щодо безпеки польоту, оскільки дозволяє пілоту контролювати напругу, якість зв'язку (LQ) та інші критичні параметри.

4) AIRMODE:

- Увімкнення AIRMODE забезпечує повну роботу ПІД-контролера навіть при нульовому положенні ручки газу. Це критично важливо для великих вантажних дронів, оскільки дозволяє зберігати контроль над БПЛА під час скидання вантажу або при різкому зниженні газу, запобігаючи неконтрольованому падінню.

```
# feature
feature -RX_PPM
feature -INFLIGHT_ACC_CAL
feature -RX_SERIAL
feature -MOTOR_STOP
feature -SERVO_TILT
feature -SOFTSERIAL
feature -GPS
feature -RANGEFINDER
feature -TELEMETRY
feature -3D
feature -RX_PARALLEL_PWM
feature -RX_MSP
feature -RSSI_ADC
feature -LED_STRIP
feature -DISPLAY
feature -OSD
feature -CHANNEL_FORWARDING
feature -TRANSPONDER
feature -AIRMODE
feature -RX_SPI
feature -ESC_SENSOR
feature -ANTI_GRAVITY
feature RX_SERIAL
feature SERVO_TILT
feature TELEMETRY
feature LED_STRIP
feature OSD
feature CHANNEL_FORWARDING
feature AIRMODE
feature ESC_SENSOR
feature ANTI_GRAVITY
```

Рисунок 3.7 – Код програми для керуванням увімкненням функцій

Активація цих функцій завершує базову графічну конфігурацію і є прямим кроком до тонкого налаштування PWM-виходів через командний рядок.

3.1.4 Налаштування живлення та моніторингу акумулятора

Коректна конфігурація розділу «Живлення та акумулятор» є критично важливою для безпеки далекобійного польоту, оскільки дозволяє точно моніторити поточний стан акумуляторної батареї, запобігаючи її надмірному розряду та втраті потужності в місії.

На рис. 3.8 зображено графічне налаштування моніторингу.

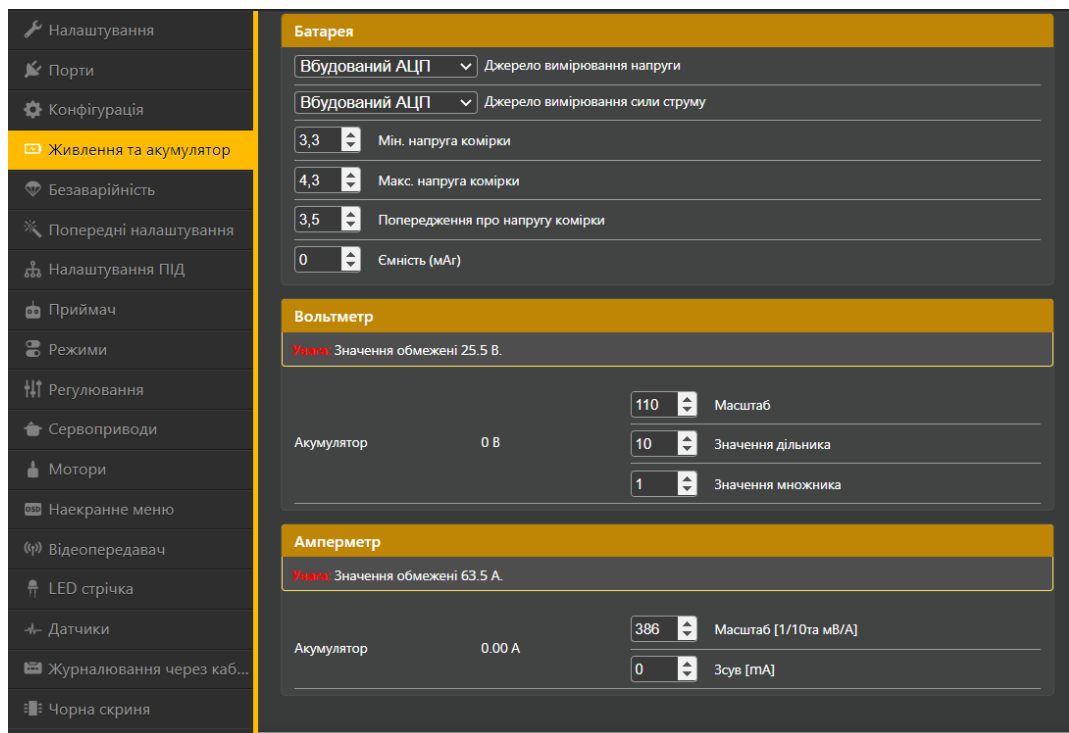


Рисунок 3.8 – Графічне налаштування моніторингу акумулятора

Налаштування моніторингу здійснюється у відповідному меню Betaflight Configurator . Ключові параметри, що задаються:

Джерело вимірювання напруги та струму: Встановлено на «Вбудований АЦП» для обох параметрів. Це означає, що польотний контролер використовує власні аналого-цифрові перетворювачі та шунтуючі резистори на платі ESC для вимірювання напруги та струму.

Напруга комірки:

- 1) мін. напруга комірки 3.3 В – це критичний поріг, нижче якого політ вважається небезпечним;
- 2) встановлено макс. напруги комірки 4.3 В, вище номінального максимуму 4.2 В для точного калібрування;
- 3) попередження про напругу комірки 3.5 В. На цьому рівні на OSD з'являється попередження, сигналізуючи пілоту про необхідність повернення.

Точність вимірювання напруги та струму залежить від калібрувальних коефіцієнтів (Scale, Divider, Multiplier), які повинні бути налаштовані для конкретного стека Speedybee F405 V3.

Нижче на рис. 3.9 наведено блок CLI-команд, що визначає параметри моніторингу живлення.

```
630 set bat_capacity = 0
631 set vbat_max_cell_voltage = 430
632 set vbat_full_cell_voltage = 410
633 set vbat_min_cell_voltage = 330
634 set vbat_warning_cell_voltage = 350
635 set vbat_hysteresis = 1
636 set current_meter = ADC
637 set battery_meter = ADC
638 set vbat_detect_cell_voltage = 300
639 set use_vbat_alerts = ON
640 set use_cbat_alerts = OFF
641 set cbat_alert_percent = 10
642 set vbat_cutoff_percent = 100
643 set force_battery_cell_count = 0
644 set vbat_display_lpf_period = 30
645 set vbat_sag_lpf_period = 2
646 set ibat_lpf_period = 10
647 set vbat_duration_for_warning = 0
648 set vbat_duration_for_critical = 0
649 set vbat_scale = 110
650 set vbat_divider = 10
651 set vbat_multiplier = 1
652 set ibata_scale = 386
653 set ibata_offset = 0
654 set ibatv_scale = 0
655 set ibatv_offset = 0
```

Рисунок 3.9 – Код програми визначення параметрів моніторингу живлення

Порогові значення напруги: Параметри `vbat_max_cell_voltage` та `vbat_min_cell_voltage`, а також `vbat_warning_cell_voltage` визначають діапазон безпечної експлуатації батареї на рівні однієї комірки. Ці значення критичні для запобігання пошкодженню LiIon-акумулятора та втраті БПЛА.

Калібрування вольтметра/амперметра:

1) масштаб напруги `vbat_scale` встановлюється на 110, забезпечуючи точне відображення напруги батареї на OSD;

2) масштаб струму `ibata_scale` встановлюється на 386. Точне калібрування цього параметра є необхідним для коректного вимірювання загального споживання мА/год.

Коректне налаштування цих параметрів забезпечує пілота життєво необхідною телеметричною інформацією в реальному часі, що дозволяє безпечно управляти дроном на великих відстанях.\

3.1.5 Налаштування системи FailSafe

На рис. 3.10 зображено меню «Безаварійність» є критично важливим для забезпечення безпеки БПЛА та виконання нефункціональних вимог, оскільки воно визначає поведінку дрона у разі повної або часткової втрати радіозв'язку з апаратурою керування. Оскільки даний дрон використовується для гуманітарних місій на великій дальності, коректне налаштування FailSafe є обов'язковим для запобігання втраті цінного обладнання та вантажу [16].

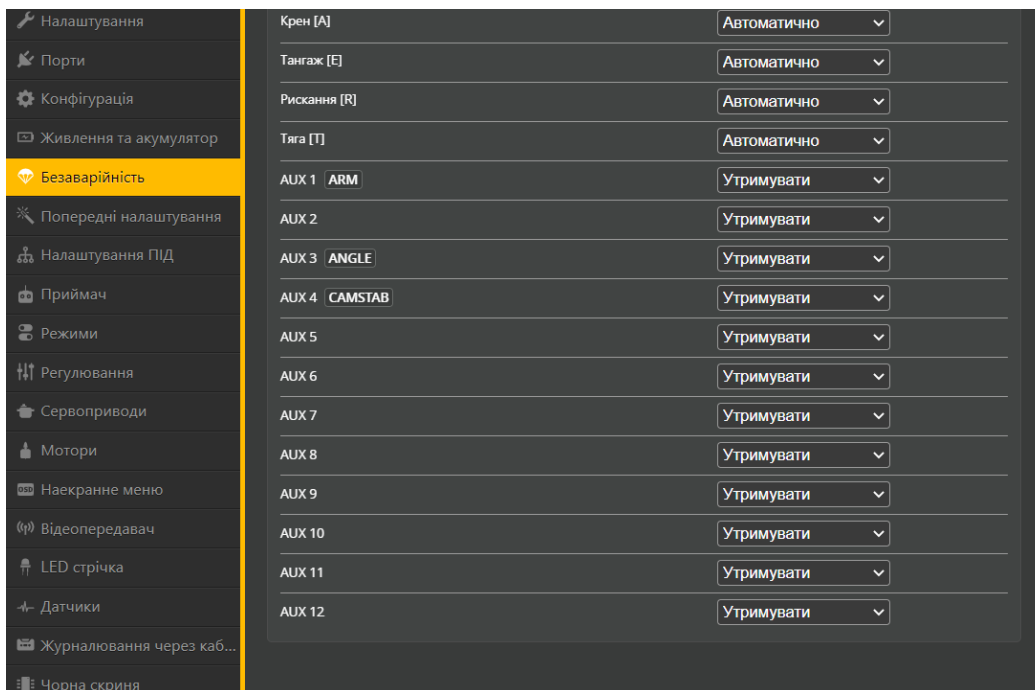


Рисунок 3.10 – Графічне налаштування фіксованих значень

Процедура FailSafe в Betaflight ділиться на два етапи. На рис. 3.11 етап 2, який визначас, що має відбутися після першої невеликої затримки, коли втрата зв'язку підтверджена:

- 1) впасти: негайно вимкнути мотори, що зазвичай використовується для малих дронів у зоні видимості;
- 2) приземлитися: Повільно знижувати висоту та м'яко приземлятися, що підходить для місій, де точне місце втрати зв'язку відоме;
- 3) GPS порятунок: Найбільш надійна опція для далекобійних місій. Дрон переходить в автоматичний режим, повертаючись до точки зльоту, використовуючи GPS-координати. Це вимагає наявності та працездатності GPS-модуля.

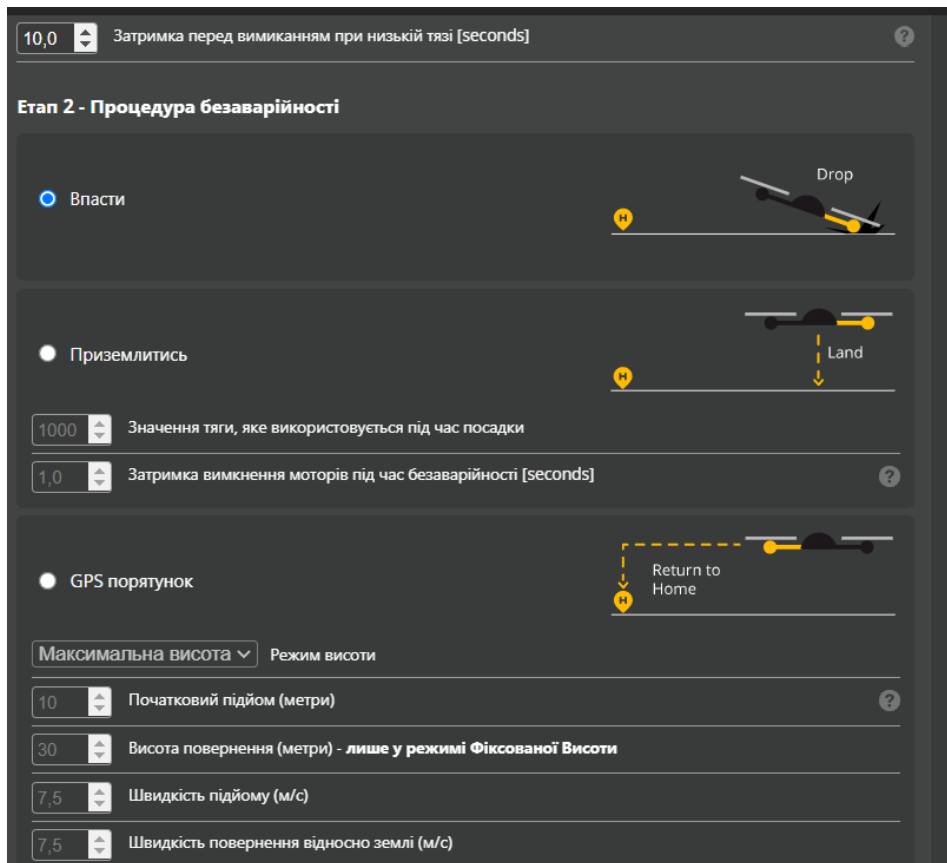


Рисунок 3.11 – Налаштування етапу 2

Для гуманітарного дрона з GPS опція «GPS порятунок» є пріоритетною. Також встановлюється час затримки перед вимкненням моторів після посадки.

Наданий блок CLI-команд на рис. 3.12 демонструє, як налаштовуються фіксовані значення для кожного каналу в режимі FailSafe.

```

496 # rxfail
497 rxfail 0 a
498 rxfail 1 a
499 rxfail 2 a
500 rxfail 3 a
501 rxfail 4 h
502 rxfail 5 h
503 rxfail 6 h
504 rxfail 7 h
505 rxfail 8 h
506 rxfail 9 h
507 rxfail 10 h
508 rxfail 11 h
509 rxfail 12 h
510 rxfail 13 h
511 rxfail 14 h
512 rxfail 15 h
513 rxfail 16 h
514 rxfail 17 h

```

Рисунок 3.12 – Код програми налаштувань безаварійності

Команда `rxfail <channel_index> <mode>` – визначає, як повинен поводитися кожен канал керування у разі активації FailSafe.

`channel_index` (0, 1, 2, 3...): Відповідає каналам AETR (Roll, Pitch, Throttle, Yaw) та AUX-каналам (AUX1, AUX2, AUX3...).

- 1) Канали 0-3: AETR (Roll, Pitch, Yaw, Throttle);
- 2) Канал 4: AUX1 ARM;
- 3) Канал 5: AUX2 VTX power;
- 4) Канал 6: AUX3 Air, Angle;
- 5) Канал 7: AUX4, який відповідає за поворот камери, CAMSTAB;
- 6) Канал 8: AUX5, який відповідає за скид вантажу.

`mode h` (Hold): Режим «Утримувати» означає, що канал буде утримувати своє останнє отримане значення перед втратою зв'язку.

Налаштування FailSafe є фінальним етапом забезпечення нефункціональних вимог щодо безпеки системи перед льотними випробуваннями.

3.1.6 Налаштування ПІД-регулятора та профілю керування

Ефективна робота великого 10-дюймового БПЛА, особливо з динамічно змінним навантаженням, вимагає точного налаштування ПІД-регулятора та встановлення оптимальних кривих керування (Rateprofile). Ці параметри визначають, як ПК реагує на помилки, спричинені вібрацією та керуючими командами пілота [19].

На рис. 3.13 зображено ПІД-регулятор, який є серцем системи керування, що забезпечує стабільність. Його коефіцієнти (P, I, D) налаштовуються для кожної осі (Roll, Pitch, Yaw). Завдяки цим коефіцієнтам можна регулювати швидкість сервоприводу для стабілізації камери.



Рисунок 3.13 – Графічні налаштування ПДів

Налаштування має бути консервативним. Занадто агресивні ПДі можуть призвести до перегріву моторів та нестабільності під час польоту з максимальним корисним навантаженням.

На рис. 3.14 зображен профіль керування, який визначає, як команди пілота перетворюються на кутову швидкість дрона. Для гуманітарної місії, де потрібна висока точність, а не швидкість фліпів, профіль налаштовується на контрольований та лінійний відгук.

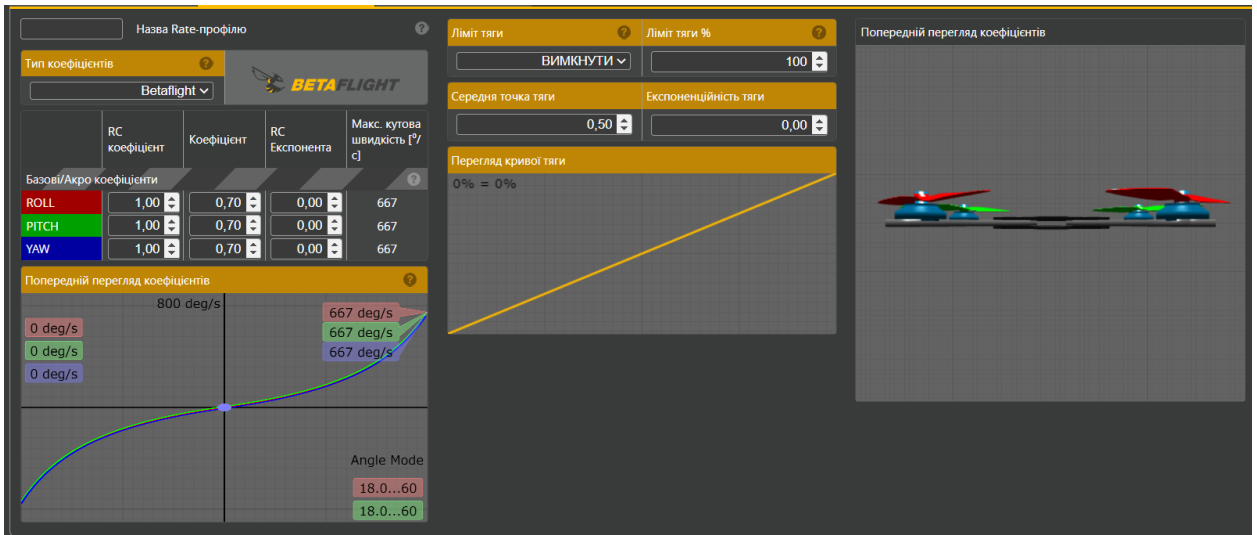


Рисунок 3.14 – Графічне налаштування профілю керування

На рис. 3.15, 3.16, 3.17 та 3.18 надано код програми встановлення м'якого, лінійного профілю керування та контрольованого та лінійного відгуку профілю ПДів, які є критичним для точного маневрування під час прицілювання та скиду вантажу, що є функціональною вимогою проекту.

```
987 profile 0
988
989 # profile 0
990 set profile_name = -
991 set dterm_lpf1_dyn_min_hz = 75
992 set dterm_lpf1_dyn_max_hz = 150
993 set dterm_lpf1_dyn_expo = 5
994 set dterm_lpf1_type = PT1
995 set dterm_lpf1_static_hz = 75
996 set dterm_lpf2_type = PT1
997 set dterm_lpf2_static_hz = 150
998 set dterm_notch_hz = 0
999 set dterm_notch_cutoff = 0
1000 set vbat_sag_compensation = 0
1001 set pid_at_min_throttle = ON
1002 set anti_gravity_gain = 80
1003 set anti_gravity_cutoff_hz = 5
1004 set anti_gravity_p_gain = 100
1005 set acc_limit_yaw = 0
1006 set acc_limit = 0
1007 set crash_dthreshold = 50
1008 set crash_gthreshold = 400
1009 set crash_setpoint_threshold = 350
1010 set crash_time = 500
1011 set crash_delay = 0
1012 set crash_recovery_angle = 10
1013 set crash_recovery_rate = 100
1014 set crash_limit_yaw = 200
1015 set crash_recovery = OFF
1016 set iterm_rotation = OFF
1017 set iterm_relax = RP
1018 set iterm_relax_type = SETPOINT
1019 set iterm_relax_cutoff = 15
1020 set iterm_windup = 85
1021 set iterm_limit = 400
1022 set pidsum_limit = 500
1023 set pidsum_limit_yaw = 400
1024 set yaw_lowpass_hz = 100
1025 set throttle_boost = 5
1026 set throttle_boost_cutoff = 15
1027 set acro_trainer_angle_limit = 20
1028 set acro_trainer_lookahead_ms = 50
1029 set acro_trainer_debug_axis = ROLL
1030 set acro_trainer_gain = 75
```

Рисунок 3.15 – Код програми налаштування профілю ПІД

```
1031 set p_pitch = 47
1032 set i_pitch = 84
1033 set d_pitch = 46
1034 set f_pitch = 125
1035 set p_roll = 45
1036 set i_roll = 80
1037 set d_roll = 40
1038 set f_roll = 120
1039 set p_yaw = 45
1040 set i_yaw = 80
1041 set d_yaw = 0
1042 set f_yaw = 120
1043 set angle_p_gain = 50
1044 set angle_feedforward = 50
1045 set angle_feedforward_smoothing_ms = 80
1046 set angle_limit = 60
1047 set angle_earth_ref = 100
1048 set horizon_level_strength = 75
1049 set horizon_limit_sticks = 75
1050 set horizon_limit_degrees = 135
1051 set horizon_ignore_sticks = OFF
1052 set horizon_delay_ms = 500
1053 set abs_control_gain = 0
1054 set abs_control_limit = 90
1055 set abs_control_error_limit = 20
1056 set abs_control_cutoff = 11
1057 set use_integrated_yaw = OFF
1058 set integrated_yaw_relax = 200
1059 set d_min_roll = 30
1060 set d_min_pitch = 34
1061 set d_min_yaw = 0
1062 set d_max_gain = 37
1063 set d_max_advance = 20
1064 set motor_output_limit = 100
1065 set auto_profile_cell_count = 0
1066 set launch_control_mode = NORMAL
1067 set launch_trigger_allow_reset = ON
1068 set launch_trigger_throttle_percent = 20
1069 set launch_angle_limit = 0
1070 set launch_control_gain = 40
1071 set thrust_linear = 0
1072 set transient_throttle_limit = 0
1073 set feedforward_transition = 0
1074 set feedforward_averaging = OFF
1075 set feedforward_smooth_factor = 25
1076 set feedforward_jitter_factor = 7
1077 set feedforward_boost = 15
1078 set feedforward_max_rate_limit = 90
```

Рисунок 3.16 – Код програми налаштування профілю ПД

```
1079 set dyn_idle_min_rpm = 0
1080 set dyn_idle_p_gain = 50
1081 set dyn_idle_i_gain = 50
1082 set dyn_idle_d_gain = 50
1083 set dyn_idle_max_increase = 150
1084 set dyn_idle_start_increase = 50
1085 set level_race_mode = OFF
1086 set simplified_pids_mode = RPY
1087 set simplified_master_multiplier = 100
1088 set simplified_i_gain = 100
1089 set simplified_d_gain = 100
1090 set simplified_pi_gain = 100
1091 set simplified_dmax_gain = 100
1092 set simplified_feedforward_gain = 100
1093 set simplified_pitch_d_gain = 100
1094 set simplified_pitch_pi_gain = 100
1095 set simplified_dterm_filter = ON
1096 set simplified_dterm_filter_multiplier = 100
1097 set tpa_mode = D
1098 set tpa_rate = 65
1099 set tpa_breakpoint = 1350
1100 set tpa_low_rate = 20
1101 set tpa_low_breakpoint = 1050
1102 set tpa_low_always = OFF
1103 set ez_landing_threshold = 25
1104 set ez_landing_limit = 15
1105 set ez_landing_speed = 50
```

Рисунок 3.17 – Код програми налаштування профілю ПД

```
rateprofile 0

# rateprofile 0
set rateprofile_name = -
set thr_mid = 50
set thr_expo = 0
set rates_type = BETAFLIGHT
set quickrates_rc_expo = OFF
set roll_rc_rate = 100
set pitch_rc_rate = 100
set yaw_rc_rate = 100
set roll_expo = 0
set pitch_expo = 0
set yaw_expo = 0
set roll_srate = 70
set pitch_srate = 70
set yaw_srate = 70
set throttle_limit_type = OFF
set throttle_limit_percent = 100
set roll_rate_limit = 1998
set pitch_rate_limit = 1998
set yaw_rate_limit = 1998
```

Рисунок 3.18 – Код програми налаштування профілю керування

3.1.7 Перевірка каналів приймача

Меню «Приймач» є ключовим інструментом для перевірки коректності зв'язку між апаратурою керування та польотним контролером, а також для калібрування діапазонів каналів. Цей етап є обов'язковим для підтвердження того, що команди пілота передаються без спотворень, а канали AUX готові до керування спеціалізованим функціоналом.

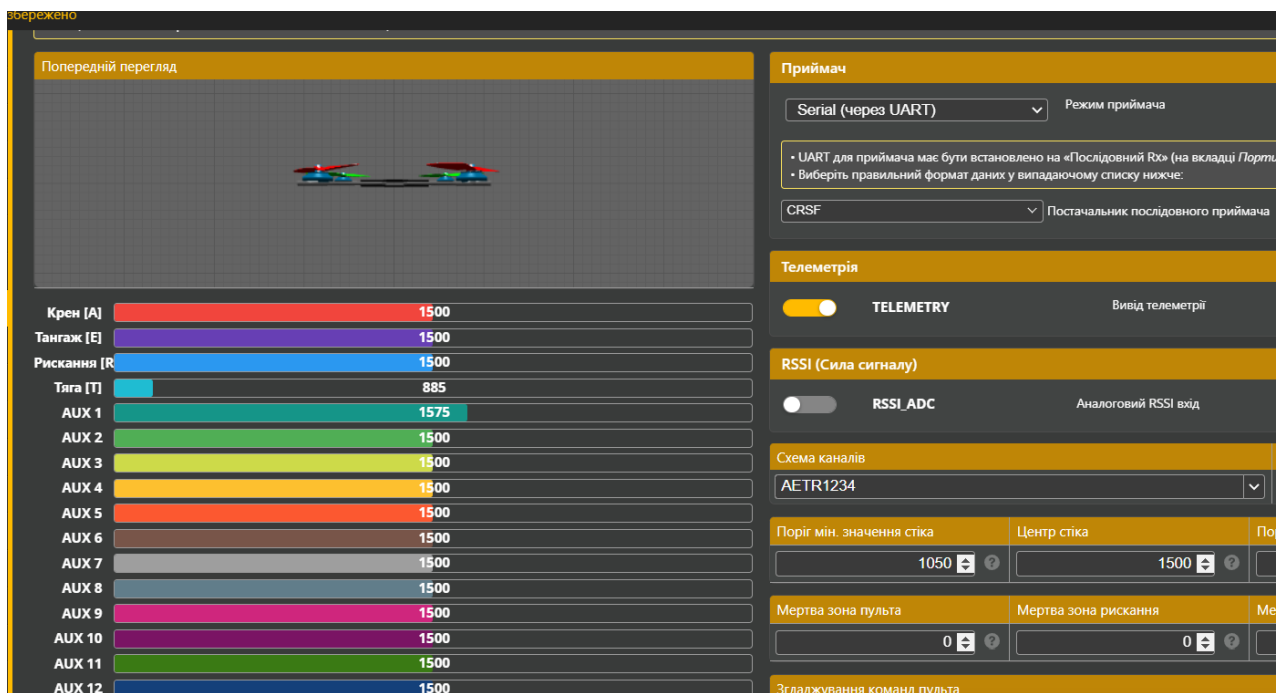


Рисунок 3.19 – Графічне налаштування приймача

На рис. 3.19 у розділі «Приймач» необхідно переконатися, що режим приймача встановлено на Serial via UART та постачальник послідовного приймача встановлено на CRSF. Це підтверджує, що ПК готовий приймати високошвидкісний потік даних від приймача ELRS, підключеного до UART6.

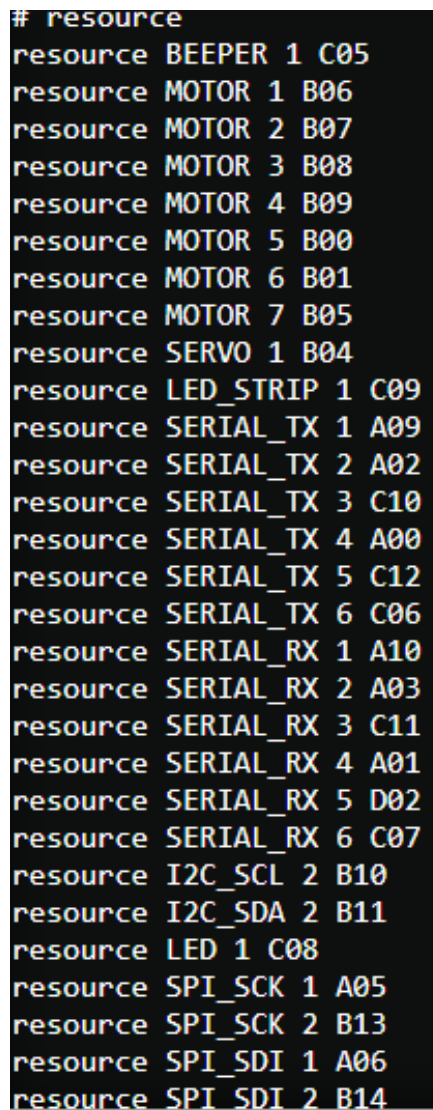
3.1.8 Реалізація керування сервоприводами та конфігурація каналів AUX

Програмна реалізація унікального функціоналу є кульмінацією конфігурації. Вона вимагає ідеальної синхронізації апаратних з'єднань виводи M5/M8 до сервоприводів та логічної прив'язки AUX-каналів.

Програмне перепризначення ресурсів є найважливішим, оскільки він дозволяє мікроконтролеру STM32F405 використовувати невикористані фізичні порти для керування сервоприводами. Стандартно, порти M5 та M8 призначені для моторів 5 та 8. У квадрокоптері вони вільні і можуть бути перепризначені на виходи PWM, необхідні для керування сервоприводами.

На рис. 3.20 зображено перший крок перевірки поточного призначення ресурсів у CLI `resource`. Після цього на рис. 3.21 необхідно «звільнити» порти M5 та M8 від їхнього моторного призначення за допомогою команди:

```
resource MOTOR 5 None;  
resource MOTOR 6 None;
```



```
# resource  
resource BEEPER 1 C05  
resource MOTOR 1 B06  
resource MOTOR 2 B07  
resource MOTOR 3 B08  
resource MOTOR 4 B09  
resource MOTOR 5 B00  
resource MOTOR 6 B01  
resource MOTOR 7 B05  
resource SERVO 1 B04  
resource LED_STRIP 1 C09  
resource SERIAL_TX 1 A09  
resource SERIAL_TX 2 A02  
resource SERIAL_TX 3 C10  
resource SERIAL_TX 4 A00  
resource SERIAL_TX 5 C12  
resource SERIAL_TX 6 C06  
resource SERIAL_RX 1 A10  
resource SERIAL_RX 2 A03  
resource SERIAL_RX 3 C11  
resource SERIAL_RX 4 A01  
resource SERIAL_RX 5 D02  
resource SERIAL_RX 6 C07  
resource I2C_SCL 2 B10  
resource I2C_SDA 2 B11  
resource LED 1 C08  
resource SPI_SCK 1 A05  
resource SPI_SCK 2 B13  
resource SPI_SDI 1 A06  
resource SPI_SDI 2 B14
```

Рисунок 3.20 – Перевірка поточних ресурсів у CLI

```
# resource MOTOR 5 None  
Resource is freed  
  
# resource SERVO 2 B00  
Resource is set to B00
```

Рисунок 3.21 – Ремаппінг ресурсів у CLI

Звільнення цих ресурсів робить фізичні піни B00 для M5 та B04 для M8 доступними для нового функціоналу.

На рис. 3.22 вільним апаратним контактам B00 та B04 призначаються логічні сервовиводи Servo 1 та Servo 2, відповідно до апаратної схеми.

```
resource SERVO 1 B00  
resource SERVO 2 B04
```

Рисунок 3.22 – Код програми призначення сервоприводів

Це гарантує, що сигнали, згенеровані для логічних Servo 1 та Servo 2 у Betaflight, будуть фізично відправлятися на виводи, до яких підключені сервоприводи.

Після того, як апаратні ресурси були перепризначені, необхідно логічно пов'язати канали керування з функціями сервоприводів у розділі «Режими». Це визначає, який перемикач чи ручка на апаратурі керування активує ту чи іншу функцію.

Призначення пропорційного керування та стабілізації нахилу камери:

- 1) Функція: CAMSTAB.
- 2) Канал: AUX4.

3) Діапазон: Встановлюється пропорційний діапазон, 1375–1600. Оскільки AUX4 прив'язаний до пропорційної ручки, рух цієї ручки тепер змінює положення сервоприводу.

Команди на рис. 3.23 підтверджують логічну прив'язку функцій до AUX-каналів. Наприклад, `aux 2 8 3 1375 1600 0 0` (де 3 — це AUX4) визначає, що функція нахилу та стабілізації камери буде активна в заданому діапазоні 1375–1600.

```
aux 0 0 0 1600 2100 0 0
aux 1 1 2 1500 2100 0 0
aux 2 8 3 1375 1600 0 0
```

Рисунок 3.23 – Код програми налаштування діапазону роботи арму, режиму польоту та стабілізації камери

Фінальне калібрування виконується у розділі «Сервоприводи» для визначення фізичних меж руху кожного актуатора.

На рис. 3.24 зображено команда `servo 0` з каналом 7 та діапазоном 500–2500 підтверджує налаштування на пропорційне керування камерою. Команда `servo 1` з каналом 8 та діапазоном 500–2000 підтверджує налаштування для дискретного механізму скиду.

```
# servo
servo 0 500 2500 1500 100 7
servo 1 500 2000 1500 100 8
servo 2 1000 2000 1500 100 -1
servo 3 1000 2000 1500 100 -1
servo 4 1000 2000 1500 100 -1
servo 5 1000 2000 1500 100 -1
servo 6 1000 2000 1500 100 -1
servo 7 1000 2000 1500 100 -1
```

Рисунок 3.24 – Код програми налаштування сервоприводів

3.1.9 Конфігурація моторів та протоколу ESC

Меню «Мотори» Betaflight Configurator є ключовим для забезпечення коректної взаємодії польотного контролера з регуляторами швидкості та моторами. Цей розділ дозволяє визначити протокол обміну даними, підтвердити правильний порядок підключення моторів та, що найважливіше, встановити напрямок обертання моторів для коректної аеродинаміки.

На рис. 3.25 зображено налаштування моторів у Betaflight Configurator.

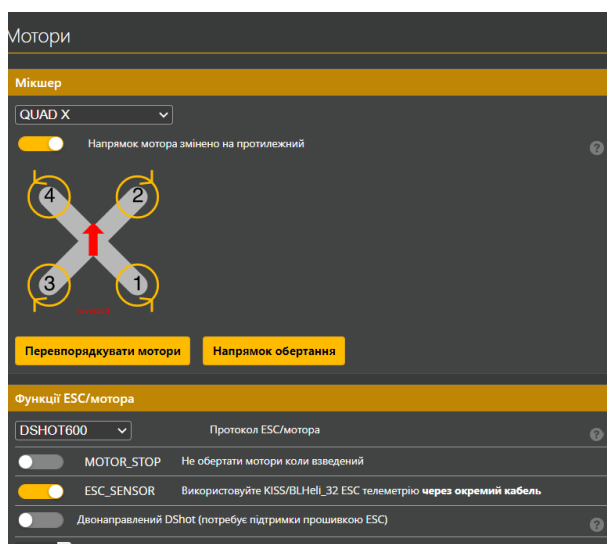


Рисунок 3.25 – Графічне налаштування моторів

У розділі «Протокол ESC/мотора» вибирається протокол. Для FPV-дронів високої продуктивності, включаючи дану платформу, обирається DShot600.

Протокол DShot є цифровим, що забезпечує більшу стійкість до електричного шуму порівняно з аналоговими протоколами (PWM, OneShot). DShot600 має швидкість обміну даними 600 кГц, що гарантує низьку затримку та точний контроль над обертами моторів. Ця точність є важливою для ПД-регулятора, щоб ефективно протидіяти інерції та вібрації 10-дюймової платформи.

Для коректного польоту квадрокоптера половина моторів повинна обертатися за годинниковою стрілкою CW, а інша половина — проти годинникової стрілки CCW. Це забезпечує компенсацію реактивного моменту та створює стабілізуючі потоки повітря.

Опція ESC_SENSOR дозволяє польотному контролеру отримувати телеметрію від ESC, забезпечуючи додатковий контроль за працездатністю силової установки.

3.1.10 Налаштування екранного меню

Налаштування екранного меню (OSD) є критично важливим для забезпечення ситуаційної обізнаності пілота, особливо під час виконання гуманітарних місій на великій дальності та під час точного скидання вантажу. OSD накладає життєво необхідні дані телеметрії та стану системи на аналоговий відеосигнал, що надходить у FPV-окуляри.

На рис. 3.26 зображені ключові елементи OSD для гуманітарної місії:

- 1) графічний елемент, що відображає кути нахилу та ризикання дрона. Він необхідний для візуальної орієнтації, особливо при поверненні до бази або в умовах низької видимості, а також допомагає пілоту швидко вирівняти дрон;
- 2) відображає поточний активний режим. Це дозволяє пілоту підтвердити активацію необхідних режимів, включаючи Rescue Mode або режим скиду;
- 3) відображення поточної висоти над землею. Це критично важливо для безпечного польоту, а також для точного прицілювання та скиду вантажу з визначеної висоти;
- 4) відображається загальна напруга батареї та напруга на комірці. Це найважливіший показник для прийняття рішення про повернення;
- 5) відображення спожитої ємності в mAh. Цей параметр дає найбільш точну оцінку залишкового часу польоту;

б) візуальне повідомлення LOW VOLTAGE або CRITICAL з'являється при досягненні критичних порогів, встановлених у розділі «Живлення та акумулятор» (наприклад, 3.5 В комірка);

7) відображаються поточний канал та потужність VTX. Ці дані дозволяють пілоту контролювати якість та дальність відеозв'язку та підтвердити, що SmartAudio коректно змінив параметри перед далекобійною місією;

8) відображення відсотка якості зв'язку (99%, 50%, 0%). Падіння цього показника нижче 20% слугує основним тригером для активації системи FailSafe, що є ключовою вимогою до нефункціональної безпеки.

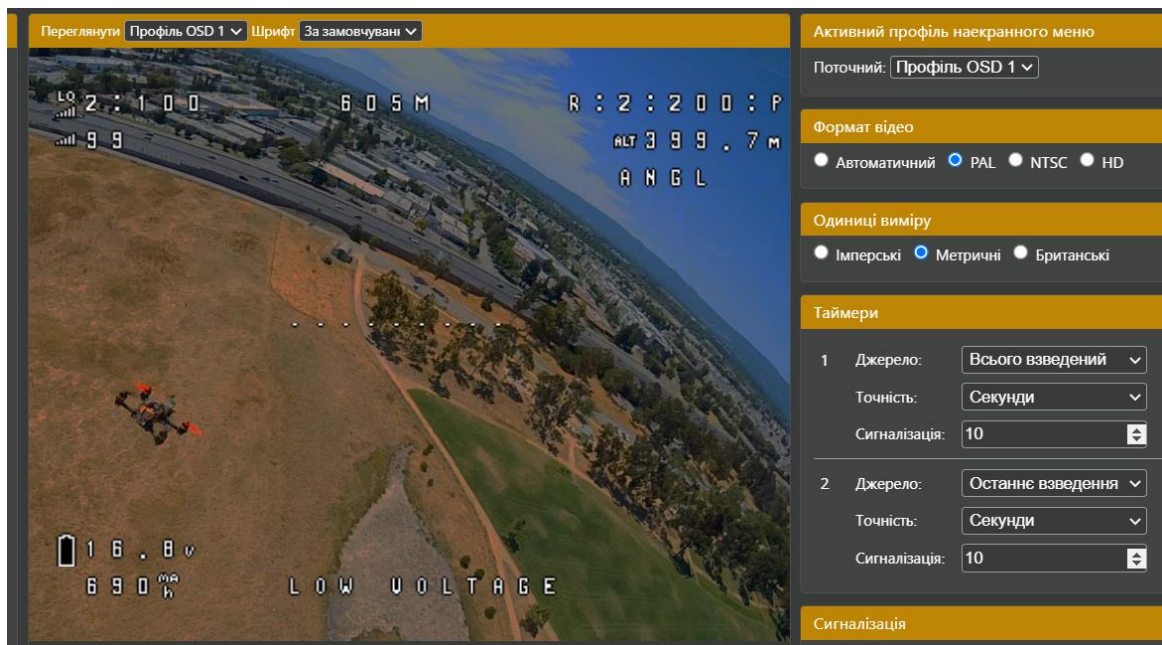


Рисунок 3.26 – Графічне налаштування OSD

Також на рис. 3.27, 3.28 та 3.29 зображено блок коду налаштувань елементів наекранного меню. Якщо значення елемента дорівнює ≤ 341 – це значить, що елемент виключений.

```
set osd_units = METRIC
set osd_warn_bitmask = 270335
set osd_rssi_alarm = 20
set osd_link_quality_alarm = 80
set osd_rssi_dbm_alarm = -60
set osd_rsnr_alarm = 4
set osd_cap_alarm = 2200
set osd_alt_alarm = 100
set osd_distance_alarm = 0
set osd_esc_temp_alarm = 0
set osd_esc_rpm_alarm = -1
set osd_esc_current_alarm = -1
set osd_core_temp_alarm = 70
set osd_ah_max_pitch = 20
set osd_ah_max_roll = 40
set osd_ah_invert = OFF
set osd_logo_on_arwing = OFF
set osd_logo_on_arwing_duration = 5
set osd_tim1 = 2560
set osd_tim2 = 2561
set osd_vbat_pos = 14753
set osd_rssi_pos = 14401
set osd_link_quality_pos = 14369
set osd_link_tx_power_pos = 341
set osd_rssi_dbm_pos = 33
set osd_rsnr_pos = 341
set osd_tim_1_pos = 341
set osd_tim_2_pos = 341
set osd_remaining_time_estimate_pos = 341
set osd_flymode_pos = 14455
set osd_anti_gravity_pos = 341
set osd_g_force_pos = 341
set osd_throttle_pos = 341
set osd_vtx_channel_pos = 14389
set osd_crosshairs_pos = 312
set osd_ah_sbar_pos = 313
set osd_ah_pos = 14446
set osd_current_pos = 341
```

Рисунок 3.27 – Код програми налаштування елементів OSD

```
set osd_mah_drawn_pos = 14785
set osd_wh_drawn_pos = 341
set osd_motor_diag_pos = 341
set osd_craft_name_pos = 14380
set osd_pilot_name_pos = 341
set osd_gps_speed_pos = 341
set osd_gps_lon_pos = 341
set osd_gps_lat_pos = 341
set osd_gps_sats_pos = 341
set osd_home_dir_pos = 341
set osd_home_dist_pos = 341
set osd_flight_dist_pos = 341
set osd_compass_bar_pos = 341
set osd_altitude_pos = 14423
set osd_pid_roll_pos = 341
set osd_pid_pitch_pos = 341
set osd_pid_yaw_pos = 341
set osd_debug_pos = 341
set osd_power_pos = 341
set osd_pidrate_profile_pos = 341
set osd_warnings_pos = 14794
set osd_avg_cell_voltage_pos = 341
set osd_pit_ang_pos = 341
set osd_rol_ang_pos = 341
set osd_battery_usage_pos = 341
set osd_disarmed_pos = 341
set osd_nheading_pos = 341
set osd_up_down_reference_pos = 312
set osd_ready_mode_pos = 341
set osd_nvario_pos = 341
set osd_esc_tmp_pos = 341
set osd_esc_rpm_pos = 341
set osd_esc_rpm_freq_pos = 341
set osd_rtc_date_time_pos = 341
set osd_adjustment_range_pos = 341
set osd_flip_arrow_pos = 341
set osd_core_temp_pos = 341
set osd_log_status_pos = 341
set osd_stick_overlay_left_pos = 341
```

Рисунок 3.28 – Код програми налаштування елементів OSD

```
set osd_stick_overlay_right_pos = 341
set osd_stick_overlay_radio_mode = 2
set osd_rate_profile_name_pos = 341
set osd_pid_profile_name_pos = 341
set osd_profile_name_pos = 341
set osd_rcchannels_pos = 341
set osd_camera_frame_pos = 142
set osd_efficiency_pos = 341
set osd_total_flights_pos = 341
set osd_aux_pos = 341
set osd_sys_goggle_voltage_pos = 341
set osd_sys_vtx_voltage_pos = 341
set osd_sys_bitrate_pos = 341
set osd_sys_delay_pos = 341
set osd_sys_distance_pos = 341
set osd_sys_lq_pos = 341
set osd_sys_goggle_dvr_pos = 341
set osd_sys_vtx_dvr_pos = 341
set osd_sys_warnings_pos = 341
set osd_sys_vtx_temp_pos = 341
set osd_sys_fan_speed_pos = 341
set osd_stat_bitmask = 14124
set osd_profile = 1
set osd_profile_1_name = -
set osd_profile_2_name = -
set osd_profile_3_name = -
set osd_gps_sats_show_pdop = OFF
set osd_displayport_device = AUTO
set osd_rcchannels = -1,-1,-1,-1
set osd_camera_frame_width = 24
set osd_camera_frame_height = 11
set osd_stat_avg_cell_value = OFF
set osd_framerate_hz = 12
set osd_menu_background = TRANSPARENT
set osd_aux_channel = 1
set osd_aux_scale = 200
set osd_aux_symbol = 65
set osd_canvas_width = 30
set osd_canvas_height = 16
```

Рисунок 3.29 – Код програми налаштування елементів OSD

Оптимальне розміщення цих елементів на екрані мінімізує когнітивне навантаження на пілота, дозволяючи йому швидко зчитувати критичні параметри під час виконання складних маневрів скиду.

3.1.11 Налаштування відеопередавача та сітки каналів

Меню «Відеопередавач» Betaflight Configurator використовується для програмного керування VTX RushFPV MaxSolo через протокол SmartAudio. Налаштування VTX через ПК є більш надійним, ніж ручне керування кнопками.

Сітка VTX Table визначає, які діапазони, канали та потужності будуть доступні для використання. Це особливо важливо для забезпечення сумісності з антенами. На рис. 3.30 у меню відображаються стандартні діапазони частот (A, B, E, F, R, L, X) [18].

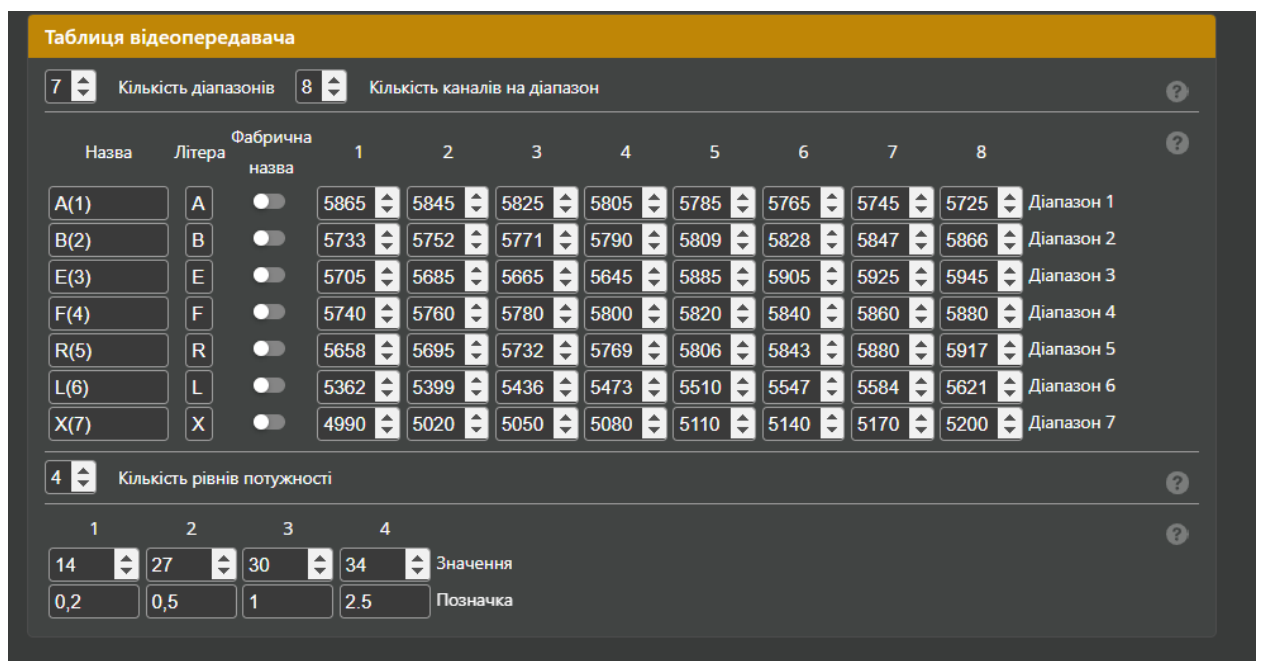


Рисунок 3.30 – Графічне налаштування сітки відеопередавача

Для даної місії обрано канал A1 (Діапазон A, Канал 1), який відповідає частоті 5865 МГц. Вибір цього каналу обґрунтований його мінімальним КСХ для обраної антени. Антени, як правило, мають оптимальну робочу точку на певній частоті, $КСХ \approx 1.0$. Налаштування VTX на частоту, близьку до резонансної частоти антени, мінімізує відбиту потужність, максимізує ефективну випромінювану потужність та запобігає перегріву вихідного каскаду VTX.

```
# vtable
vtable bands 7
vtable channels 8
vtable band 1 A(1)      A CUSTOM  5865 5845 5825 5805 5785 5765 5745 5725
vtable band 2 B(2)      B CUSTOM  5733 5752 5771 5790 5809 5828 5847 5866
vtable band 3 E(3)      E CUSTOM  5705 5685 5665 5645 5885 5905 5925 5945
vtable band 4 F(4)      F CUSTOM  5740 5760 5780 5800 5820 5840 5860 5880
vtable band 5 R(5)      R CUSTOM  5658 5695 5732 5769 5806 5843 5880 5917
vtable band 6 L(6)      L CUSTOM  5362 5399 5436 5473 5510 5547 5584 5621
vtable band 7 X(7)      X CUSTOM  4990 5020 5050 5080 5110 5140 5170 5200
vtable powerlevels 4
vtable powervalues 14 27 30 34
vtable powerlabels 0,2 0,5 1 2.5

# vtx
vtx 0 1 0 0 1 900 1200
vtx 1 1 0 0 3 1300 1600
vtx 2 1 0 0 4 1800 2100
```

Рисунок 3.31 – Код програми кастомної сітки каналів відеопередавача

На рис. 3.31 зображено блок коду в якому описана сітка відеопередавача та рівні потужності відеопередавача. За стандартом потужність відеопередавача стоїть на AUX 2. Цей параметр можна змінити тільки програмно за допомогою CLI команд.

3.2 Оновлення прошивки та прив'язка приймача ExpressLRS

Система ExpressLRS забезпечує високошвидкісний та далекобійний канал керування 2.4 ГГц, який критично важливий для даного проєкту. Надійність ELRS вимагає, щоб версія прошивки на приймачі Betafpv 2.4 Nano RX та модулі передавача керування були ідентичними.

На рис. 3.32 для оновлення та налаштування ELRS використовується спеціалізоване програмне забезпечення – ExpressLRS Configurator. У нових версіях доступний зручний веб-інтерфейс, рисунок 3.33, який дозволяє швидко створювати прошивки [23].

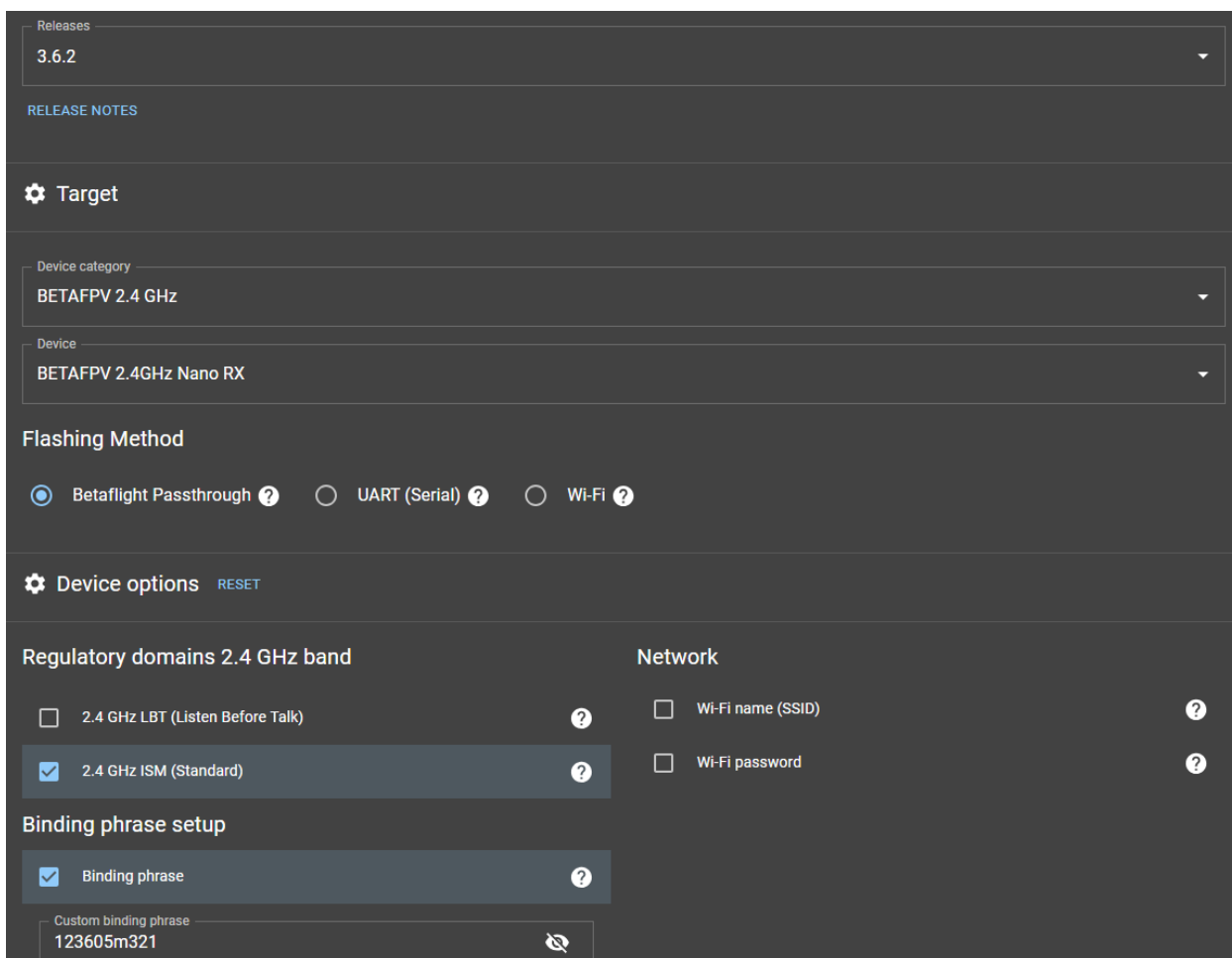


Рисунок 3.32 – Конфігурація прошивки у ExpressLRS Configurator

Процедура прошивання приймача ExpressLRS Betafpv 2.4 Nano RX виконується з використанням режиму Betaflight Passthrough. Цей режим дозволяє ПК, підключеному до комп'ютера, виступати як міст для передачі даних на приймач ELRS, який фізично підключений до UART6.

- 1) вибирається відповідний тип приймача BETA FPV 2400 Nano RX;
- 2) вибирається актуальна версія, яка має точно відповідати версії на передавачі;
- 3) встановлюється Betaflight Passthrough, що є найзручнішим для приймачів, вже вмонтованих у дрон.



Рисунок 3.33 – Веб-інтерфейс прошивки приймача

Після генерації прошивки у Configurator, вона завантажується на ПК. ПК, у свою чергу, використовує послідовний зв'язок для передачі файлу прошивки на приймач. Це забезпечує відповідність версій прошивки між приймачем та модулем передавача, що є необхідною умовою для високошвидкісного каналу зв'язку.

Завдяки використанню ID-фрази, прив'язка відбувається автоматично після оновлення прошивки та подачі живлення на дрон. Успішна прив'язка приймача підтверджується появою телеметричних даних у меню «Приймач» Betaflight Configurator. Це забезпечує виконання вимоги до надійного каналу зв'язку та низької затримки.

3.3 Висновок до розділу 3

У Розділі 3 було успішно завершено етап програмної конфігурації та інтеграції спеціалізованого функціоналу, що перетворило зібрану апаратну платформу на повністю функціональний БПЛА для гуманітарних місій. Всі програмні вимоги, визначені в розділі 1, були виконані за допомогою відкритого програмного забезпечення Betaflight та ExpressLRS. Проведено прошивання ПК та приймача ELRS, забезпечивши стабільний

високошвидкісний канал керування. Активувавши UART6 для CRSF та UART1 для VTX SmartAudio, було створено надійну основу для зв'язку. Здійснено Resource Remapping через CLI, де невикористані моторні виводи M5 та M8 були перепризначені на логічні сервовиводи. Це відкрило можливість керування корисним навантаженням. Канали AUX4 та Servo 1 були налаштовані на пропорційне керування нахилом камери, а AUX5 та Servo 2 на дискретне керування механізмом скиду. У меню «Сервоприводи» визначено фізичні межі руху актуаторів. Налаштовано консервативні ПІД-коефіцієнти та м'який профіль керування для забезпечення льотної стабільності 10-дюймової платформи. Налаштовано протокол DShot600 та перевірено напрямок обертання двигунів 3115/900 KV. Налаштовано OSD для відображення критичних параметрів та FailSafe, що відповідає нефункціональним вимогам до безпеки далекобійної експлуатації. Налаштовано VTX на канал A1 (5865 МГц) з потужністю 1000 мВт, оптимізований для КСХ антени, що гарантує надійність відеозв'язку. Успішне завершення програмного етапу підтверджує, що розроблений БПЛА повністю відповідає технічним вимогам та готовий до проведення експериментальних досліджень та польотних випробувань, які будуть описані в наступному розділі.

4 ТЕСТУВАННЯ ТА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОГО ФУНКЦІОНАЛУ

У цьому розділі наведено результати практичних стендових тестувань розробленого аналогового БПЛА. Мета тестування — верифікувати коректну роботу програмно-апаратного комплексу, а також оцінити ефективність та точність інтегрованих функціональних модулів: пропорційного керування нахилом камери та механізму скиду вантажу.

Тестування функціоналу проводиться двома основними, взаємодоповнювальними способами. Перший, і основний, спосіб – це динамічне керування через апаратуру. Він дозволяє оцінити продуктивність системи в реальному часі: чутливість стіків, швидкість відгуку сервоприводів та загальну ергономіку керування. У цьому режимі функціонал, такий як нахил камери та скид вантажу, активується пілотом безпосередньо через призначені перемикачі або ручки на пульті керування.

Другий спосіб, який використовується для лабораторної верифікації та перевірки надійності, – це тестування через налаштування FailSafe у Betaflight Configurator. Цей метод дозволяє примусово встановити фіксовані імпульси PWM-сигналу на AUX-канали, що відповідають крайнім положенням сервоприводів. Це критично важливо для підтвердження, що після програмного перепризначення ресурсів виводи M5 та M8 коректно генерують сигнал PWM для керування сервоприводами, незалежно від протоколу радіозв'язку. Тестування через FailSafe підтверджує базову апаратну працездатність, що передує льотним випробуванням.

4.1 Верифікація роботи механізму нахилу FPV-камери

Тестування механізму нахилу камери підтверджує успішну програмну реалізацію керування сервоприводом SG90, який був підключений до перепризначеного виводу M5. Мета тестування – перевірити коректність графічного відображення кута нахилу та надійність механічного вузла.

На рис. 4.1 показано утримання камери після калібрування сервоприводу в Betaflight. Він встановлен таким чином, що при центральному положенні пропорційного стіка на апаратурі керування, сервопривід займає нейтральне положення, що забезпечує огляд 0° відносно осі польоту з невеликим позитивним кутом для стабільного польоту.

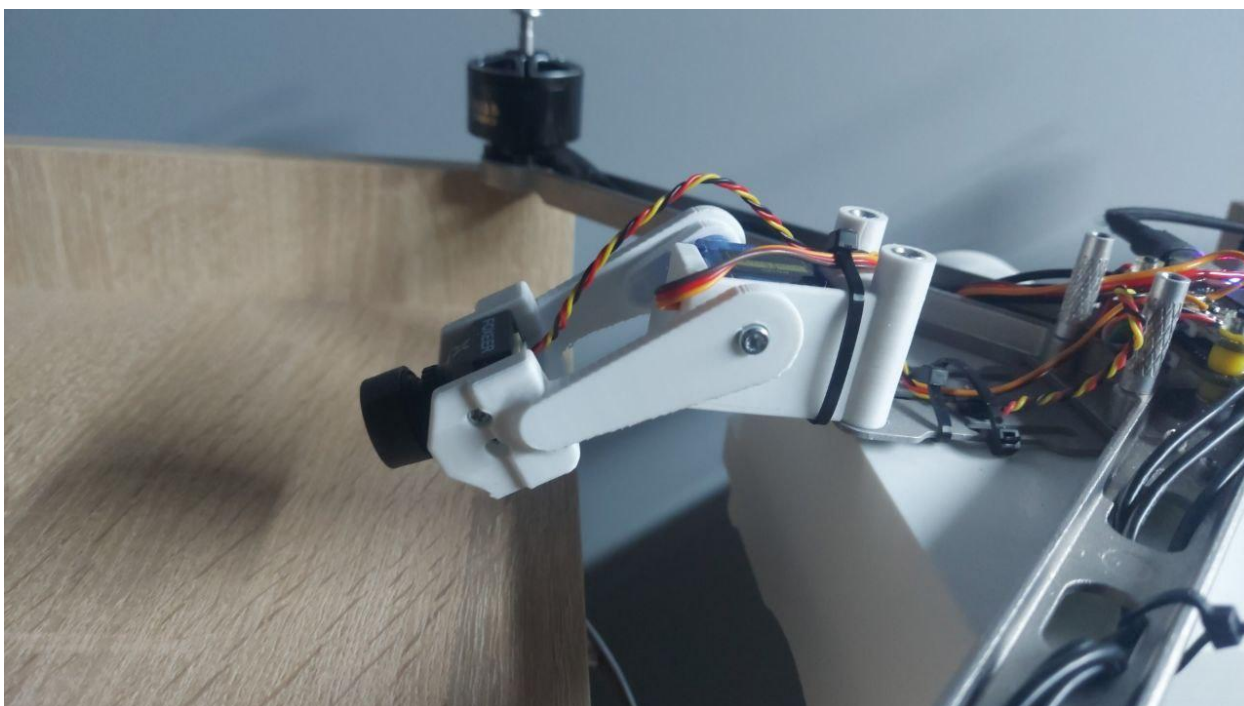


Рисунок 4.1 – Середнє положення камери

На моніторі пілота, під час зависання на малій висоті, це положення дає змогу чітко бачити об'єкт під дроном. На рис. 4.2 видно, що камера зафіксована на цілі перед собою, яким є пакет «Нова пошта», а штучний горизонт знаходиться у центрі екрана, підтверджуючи, що дрон знаходиться у горизонтальному положенні.

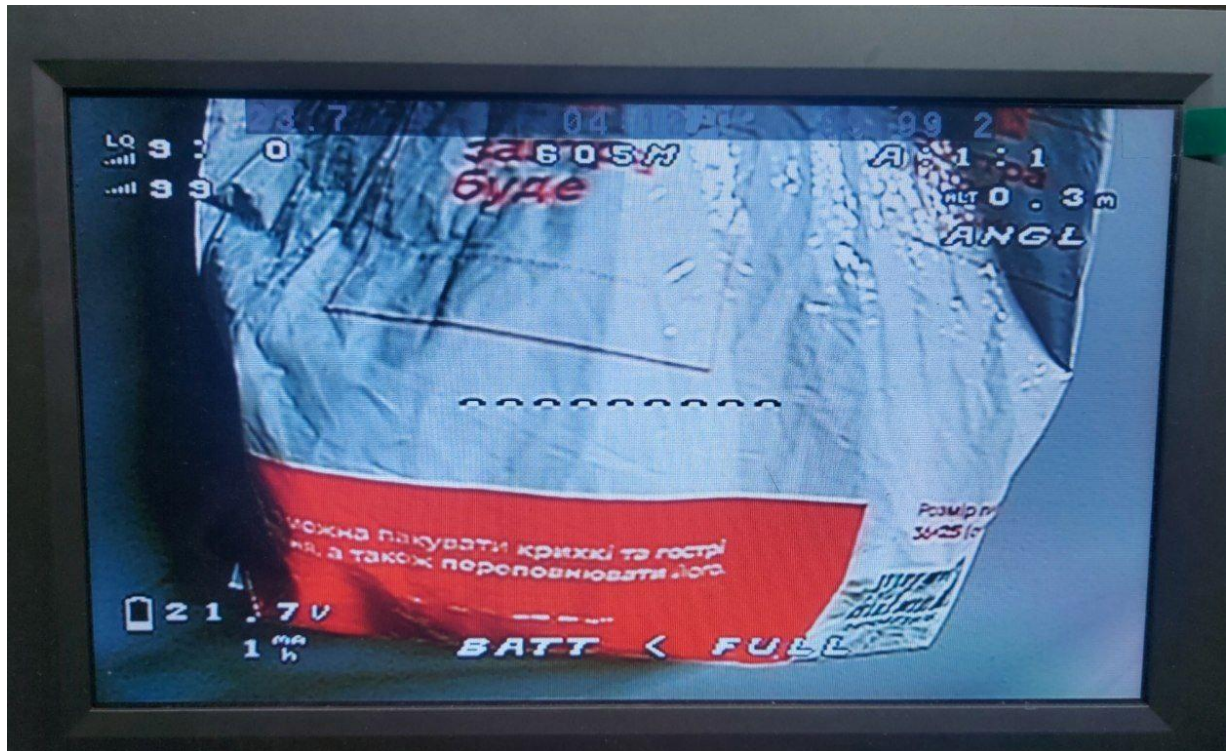


Рисунок 4.2 – Знімок з камери дрону у середньому положенні тумблеру

На рис. 4.3 для збільшення зони огляду безпосередньо під дроном або для точного прицілювання, пілот зміщує тумблер до мінімального значення. У налаштуваннях FailSafe – це 1000.

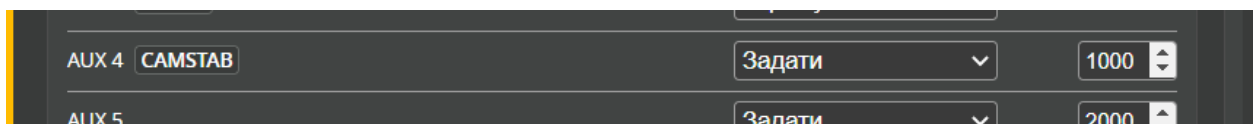


Рисунок 4.3 – Задання параметрів фейлсейву для мінімального положення

У меню «Безаварійність» для каналу AUX4 встановлюється фіксоване значення 1000 для демонстрації мінімального кута. На рис. 4.4 це призводить до нахилу камери максимально донизу.

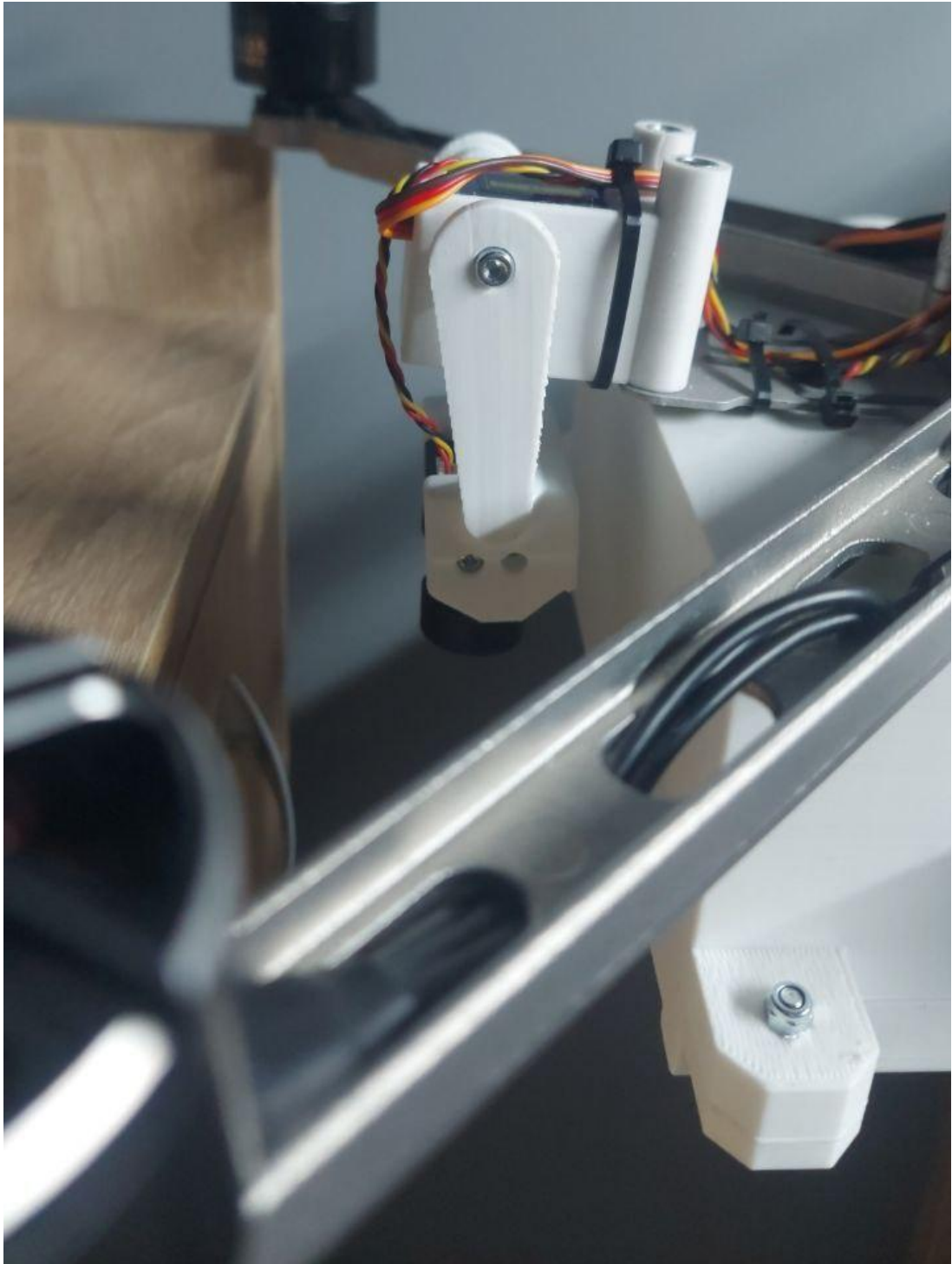


Рисунок 4.4 – Нахил камери у нижнє положення

На рис. 4.5 видно, що поле огляду змістилося до низу, що дозволяє чітко бачити об'єкт, розташований майже під центром рами.



Рисунок 4.5 – Знімок з камери дрону у верхньому положенні тумблеру

При польоті на високій швидкості або для контролю далеких об'єктів необхідний максимальний кут нахилу камери догори. Пілот зміщує тумблер до максимального значення. У налаштуваннях FailSafe – це дорівнює 2000.



Рисунок 4.6 – Задання параметрів фейлсейву для максимального положення

Для каналу AUX4 встановлюється фіксоване значення 2000. Це призводить до нахилу камери максимально вгору, як зображено на рис. 4.7.

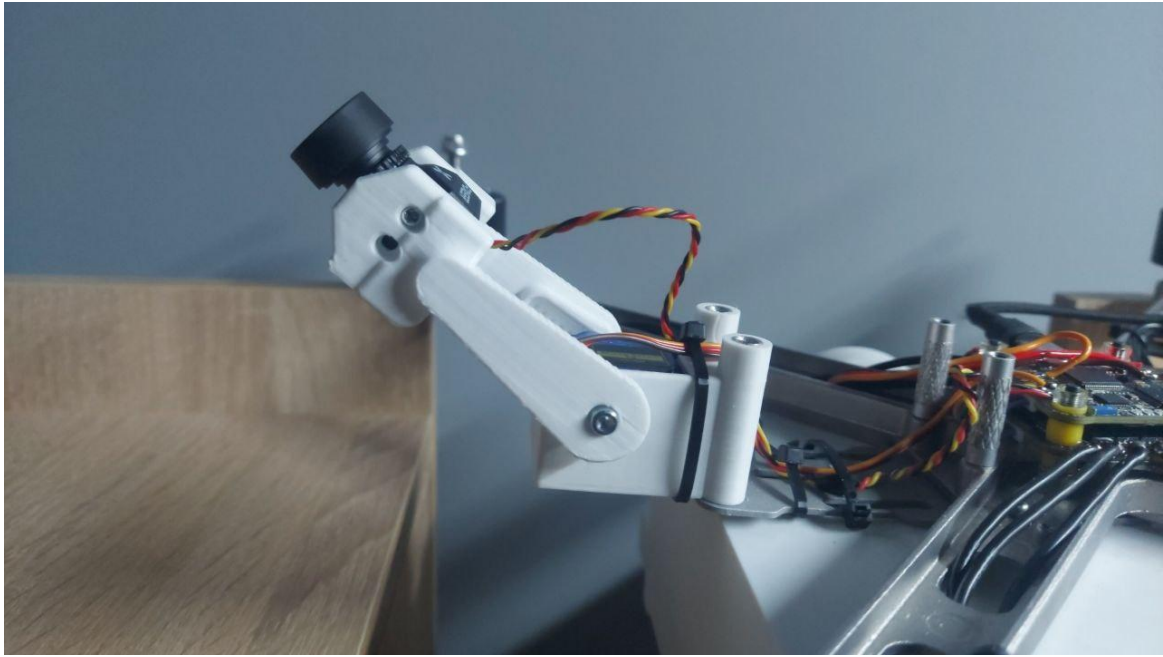


Рисунок 4.7 – Нахил камери у верхнє положення

На рис. 4.8 видно, що картинка змістилася високо вгору, а в полі огляду чітко видно верхню частину конструкції, до якої прикріплений пакет Нової пошти.



Рисунок 4.8 – Знімок з камери дрону у нижньому положенні тумблеру

Функція CAMSTAB забезпечує автоматичну компенсацію нахилу дрона під час керування. На рис. 4.9 зображено як дрон знаходиться у режимі Angle і пілот нахиляє його, система CamStab намагається утримати камеру у середньому положенні.

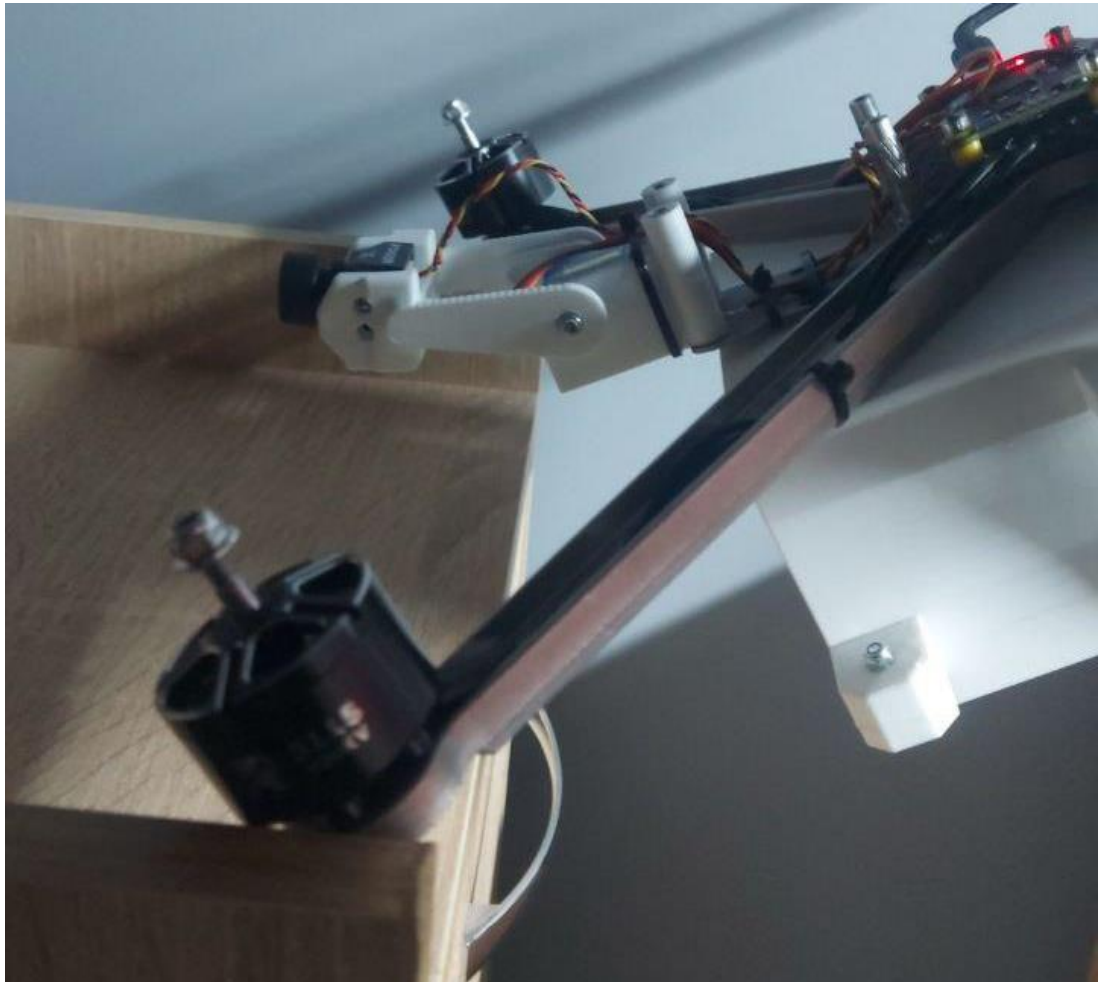


Рисунок 4.9 – Стабілізація камери в середньому положенні

При піднятті дрона вгору, коли кут нахилу ПК не знаходиться в центрі, на рис. 4.10 на OSD показано нецентричне положення штучного горизонту. Проте, завдяки активації CAMSTAB, поле огляду камери продовжує утримувати центр пакету у фокусі, підтверджуючи, що сервопривід SG90 активно компенсує кут нахилу рами. Це є ключовою вимогою для точного прицілювання під час скиду.



Рисунок 4.10 – Знімок з камери дрону під час стабілізації

Успішна верифікація роботи механізму нахилу камери підтверджує коректність програмного перепризначення ресурсів M5 та логічної прив'язки AUX4, а також механічну надійність 3D-друкованих кронштейнів.

4.2 Верифікація роботи дискретного механізму скиду

Тестування дискретного механізму скиду вантажу є критично важливим для підтвердження його надійності у двох крайніх положеннях. Для випробувань використовувався сервопривід 20 кг та вантаж масою приблизно 1 кг, пляшка води.

Мета цього етапу – підтвердити, що механізм надійно фіксує вантаж, незважаючи на вібрацію та гравітаційне навантаження. На рис. 4.11 зображено положення 1000, що відповідає мінімальному значенню імпульсу на каналі AUX5.



Рисунок 4.11 – Задання параметрів фейлсейву для положення фіксування

У меню «Безаварійність» для каналу AUX5 встановлюється фіксоване значення. Це примусово переводить сервопривід у положення, де 3д диск замикає пряжку вантажного ременя, рисунок 4.12.

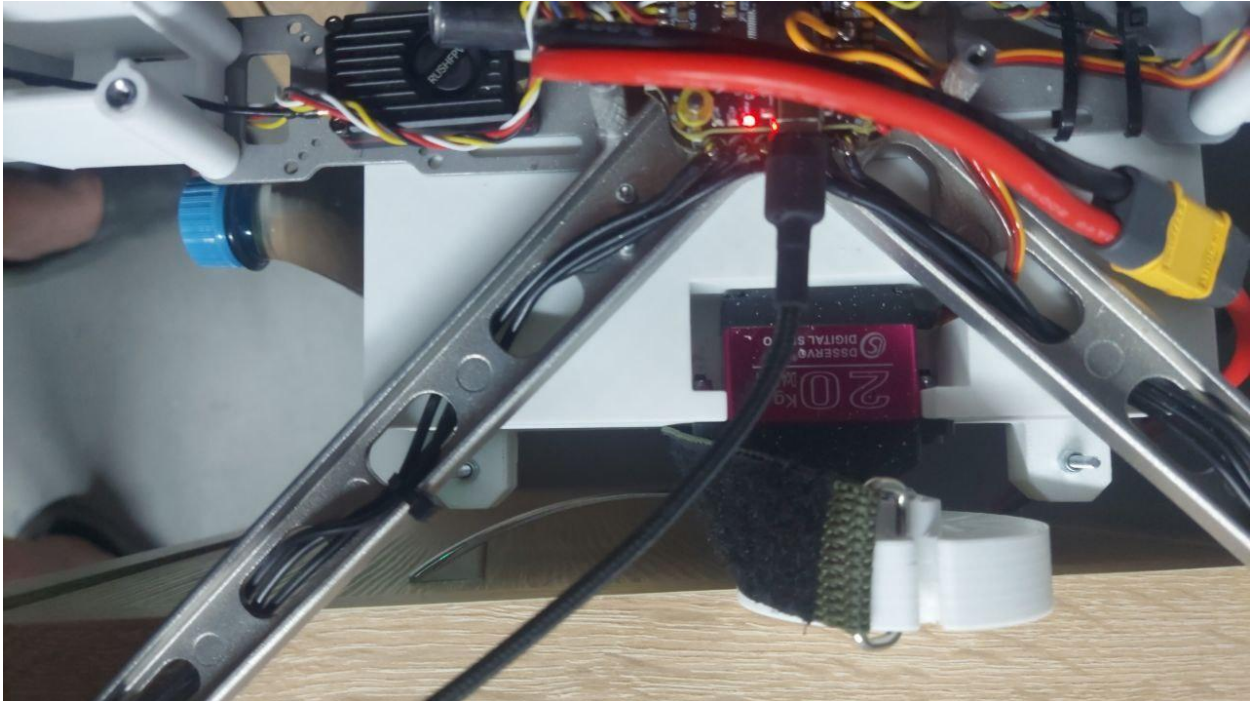


Рисунок 4.12 – Фіксація ремінню у диск

На рис. 4.13 чітко видно, що пляшка води об'язана ременем, а пряжка ременя надійно зафіксована в 3D-друкованому дисковому механізмі. Сам механізм знаходиться у вертикальному положенні, що забезпечує максимальний опір навантаженню. Вантаж повністю зафіксований і готовий до транспортування.

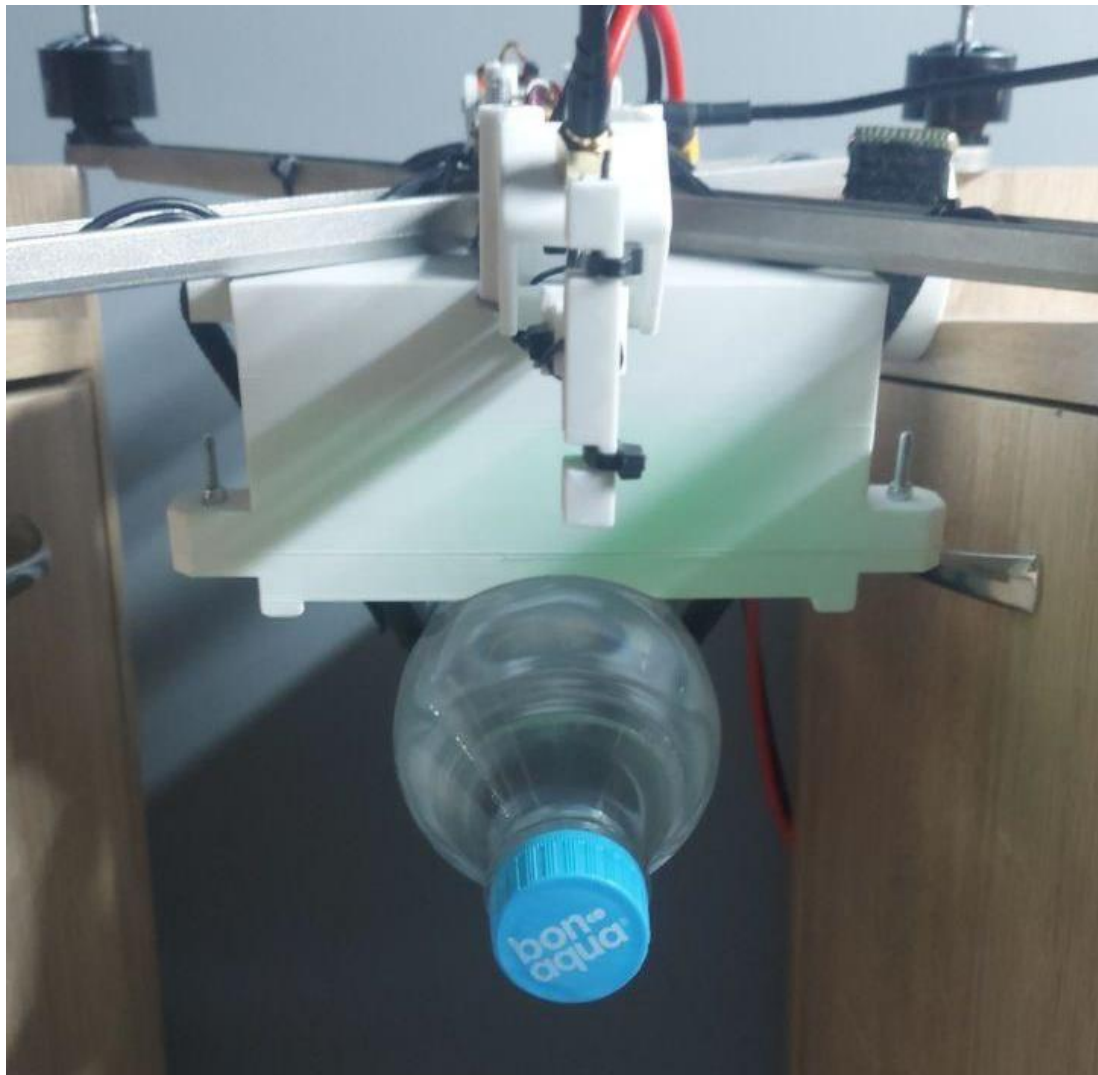


Рисунок 4.13 – Фіксація вантажу у механізмі

Етап скиду вантажу перевіряє швидкість та повноту звільнення вантажу при активації команди скиду. На рис. 4.14 задано положення 2000, яке відповідає максимальному значенню імпульсу на каналі AUX5.



Рисунок 4.14 – Задання параметрів фейлсейву для положення скиду

На рис. 4.15 видно, що сервопривід повернув 3D-друкований диск на 180° у горизонтальне положення. Пряжка ремня була звільнена, і вантаж від'єднався. Оскільки ремінь тепер вільно звисає, це підтверджує, що механізм успішно виконав свою функцію. Швидка та чітка реакція сервоприводу

гарантує, що вантаж звільняється миттєво, мінімізуючи вплив на аеродинаміку дрона у критичний момент скиду.

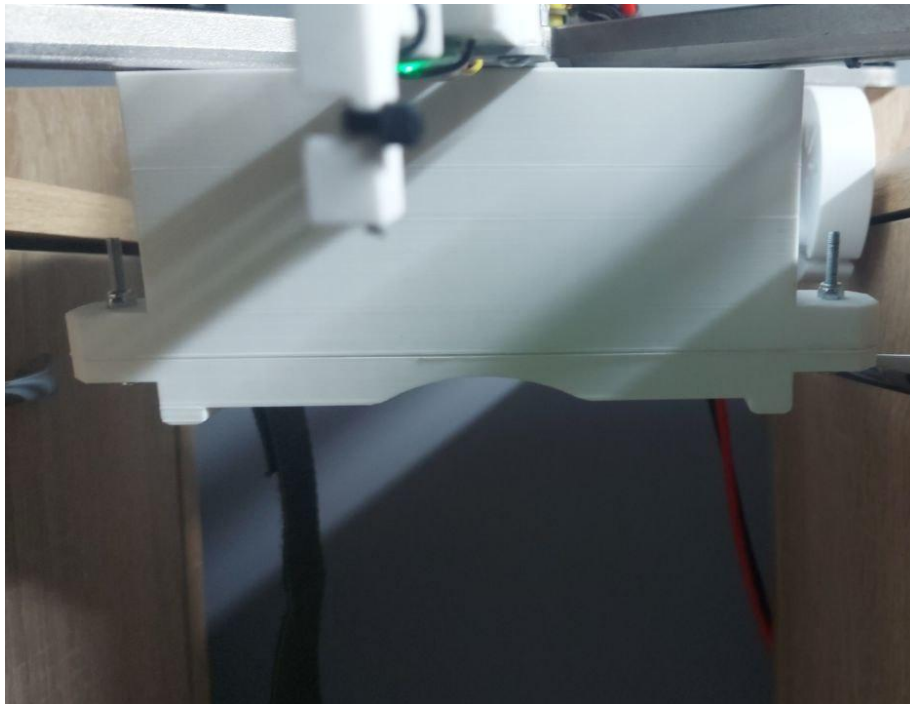


Рисунок 4.15 – Результат тестування скиду вантажа

Успішна верифікація двох крайніх положень механізму скиду підтверджує коректність програмної прив'язки AUX5 та фізичну надійність 3D-друкованої конструкції, спроектованої для роботи з потужним сервоприводом.

4.3 Висновки до розділу 4

У розділі 4 було успішно проведено тестування та верифікацію ключового функціоналу розробленого аналогового БПЛА, що підтвердило виконання усіх функціональних вимог проєкту. Тестування проводилося із застосуванням методології лабораторного контролю через налаштування FailSafe, що забезпечило об'єктивність оцінки.

Верифікація механізму нахилу FPV-камери підтвердила коректність програмної прив'язки каналу AUX4 до сервоприводу SG90. Була продемонстрована можливість плавного та контрольованого нахилу камери у

всьому діапазоні. Особливо було підтверджено ефективність функції CAMSTAB, яка автоматично компенсує нахил рами, забезпечуючи стабілізований огляд, що є критичним для точного наведення на ціль.

Верифікація дискретного механізму скиду вантажу підтвердила надійність 3D-друкованої конструкції та сервоприводу. Шляхом перевірки крайніх положень імпульсу було доведено, що механізм надійно фіксує вантаж до 1 кг у положенні «Утримання» та миттєво його звільняє при активації команди «Скид». Це гарантує, що вантаж не буде втрачено під час маневрів і буде звільнено чітко за командою.

Крім того, під час первинного тестування було підтверджено правильність електричної інтеграції відеосистеми. Успішне отримання чистого відеосигналу з накладеним OSD, що видно на всіх скріншотах з монітора демонструє коректне паяння та програмну конфігурацію FPV-камери Foxeer Razer Mini V3 та відеопередавача VTX RushFPV MaxSolo, підключених до польотного контролера. Це забезпечує пілоту необхідну візуальну інформацію для безпечного керування та виконання точних маневрів доставки.

Таким чином, результати тестування повністю підтверджують успішну реалізацію складного програмно-апаратного комплексу, що включає перепризначення ресурсів ПК та інтеграцію спеціалізованих 3D-друкованих механізмів, і демонструють, що розроблений БПЛА готовий до виконання гуманітарних місій з підвищеною точністю доставки.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна магістерська робота включає комплексний аналіз технологій та інженерне проектування, повністю відповідає поставленій меті щодо розробки аналогового Безпілотного літального апарату для виконання гуманітарних місій. На етапі теоретичного дослідження було успішно проведено порівняльний аналіз між комерційними платформами, літальними апаратами з фіксованим крилом та FPV-платформами. На основі критеріїв вартості, маневреності та програмної гнучкості було обґрунтовано вибір 10-дюймової FPV-платформи як оптимального рішення. Також проаналізовано ключові технічні рішення: контролер Speedybee F405 V3, протокол ExpressLRS 2.4 ГГц та протокол SmartAudio для керування VTX. Обґрунтовано вибір сервомеханічного підходу для реалізації функціоналу корисного навантаження.

У ході інженерного проектування та програмної конфігурації було реалізовано:

- 1) проведено огляд сучасних архітектур БПЛА, систем керування та VTX для гуманітарних місій та обґрунтовано вибір компонентної бази;
- 2) було розроблено схему підключення периферії до польотного контролеру;
- 3) були розроблені 3D-моделі для механічного кріплення сервоприводу FPV-камери та механізму скиду вантажу;
- 4) розроблено програмні моделі керування Betaflight CLI для виділених AUX-каналів, проведена конфігурація польотного контролера, включаючи налаштування протоколу керування ELRS (2.4 ГГц) та OSD;
- 5) проведено тестування для оцінки роботи механізмів нахилу камери та скиду вантажу.

Фінальне тестування повністю верифікувало працездатність системи:

- 1) підтверджено коректність програмної прив'язки AUX-каналів через FailSafe-тестування;

2) доведено надійність фіксації та миттєвого звільнення вантажу механізмом скиду;

3) підтверджено ефективність SAMSTAB для стабілізованого прицілювання. Всі налаштування оптимізовані для безпечної та далекобійної експлуатації з потенційною дальністю зв'язку до 10 км та робочою висотою до 150 м .

Таким чином, результати роботи можуть бути використані для створення FPV-дронів-логістів, що підвищить ефективність та безпеку доставки гуманітарної допомоги у кризові регіони. Результати даної кваліфікаційної магістерської роботи були представлені та прийняті на конференції Modern Information Technology 2025, яка відбулась на базі Інституту комп'ютерних систем НУ «Одеська політехніка».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Choi, Y., & Lee, W. Design and Analysis of Multi-Rotor UAV for Heavy Payload Transportation in Disaster Relief. *Journal of Unmanned Systems Engineering*. 2021. Vol. 9. No.1, P. 1–15. ISSN: 2395-5252
2. Ferraris, S., & Basso, L. The Role of Drones in Last-Mile Humanitarian Logistics: Challenges and Opportunities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020. Vol. 48. DOI: 103831.
3. Krishna D. Experimental investigation and economic evaluation of wind impacts on the solar panel array of a floating photovoltaic (FPV) system across different turbulence intensities. 2025. Vol. 17. DOI: 100380.
4. Soulimane K. Easing the tuning of drone autopilots through a model-based framework. 2023. Vol. 77. DOI: 101240.
5. Abdallah B. Impact of blade number on the aerodynamic performance of UAV propellers: A numerical and experimental study. 2019. Vol. 166. DOI: 110594
6. Thurnherr C. Drone-based impact-echo inspection system for non-destructive testing of concrete structures. 2022. Vol. 477. DOI: 141147
7. Промисловий дрон Matrice 300 RTK. *AirUnit*. URL: <https://airunit.com.ua/ua/dji-enterprise/matrice-300-rtk/drone/?srsltid=AfmBOorxxDQ74VhaLev3N6rm21kRn9ilHbYuJ1k2gUWC8oPiNSk5L7W> (дата звернення: 20.10.2025).
8. Квадрокоптер Autel EVO MAX 4T Standard Bundle без аккумулятора (102002265). *Elmir*. URL: https://elmir.ua/kvadrokoptery_i_drony/quadrocopter_autel_evo_max_4t_standard_bundle_special_version_without_battery_102002265.html (дата звернення 20.10.2025).
9. Політний стек SpeedyBee F405 V3 з FC/ESC 50A 3-6s BLHeli_S 4в1 30x30мм. *TVparts.com.ua*. URL: https://tvparts.com.ua/speedybee-f405-v3-esc-50a-3-6s-blheli.html?srsltid=AfmBOoqxvB8ghqyxсFRHoUca0I6eh--8bUE2OYqsKo2-rXh9fQDraER5_ (дата звернення 20.10.2025).

10. Приймач BetaFPV ELRS Nano rx 2.4GHZ. *RC Store*. URL: https://rc-store.com.ua/betafpv-elrs-nano-pryimach-24ghz?srsltid=AfmBOoonTL5zS082ZM_AXxR4UmvqjIPS_s9LsJDwiMaEZIVzqKD2HI44 (дата звернення 20.10.2025).
11. T. Hutsul, M. Khobzei, V. Tkach, O. Krulikovskiy, O. Moisiuk, V. Ivashko, A. Samila. Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. 2024. Vol. 10. DOI: 101016.
12. Robert van Steenbergen, Martijn Mes, Wouter van Heeswijk. Reinforcement learning for humanitarian relief distribution with trucks and UAVs under travel time uncertainty. 2023. Vol.157. DOI: 104401.
13. Henry Mutebi, Wilbroad Aryatujwika, Samuel Ssekajja Mayanja, Diana Susan Kyomuhangi, Allan Akashabaruhanga. Humanitarian supply chain resilience: the role of localized logistics preparedness capacity and inter-organizational coordination capabilities. 2025. Vol. 7. P. 146–165. DOI: 101108.
14. Marcelo A. Santos, R. Andrade, Mario B. de la Rosa, Julián Delgado, G.V. Raffo, Sergio Esteban. Multiple UAV Coordination for Enhanced Search and Rescue Missions. 2024. Vol. 59. P 2242–2247. DOI: 101016.
15. Monica Adhiambo Onyango, Bukiwe Sihlongonyane, Nishita Patel. Humanitarian Response to Complex Emergencies and Natural Disasters. 2025. Vol. 5. P 773–786. DOI: 101016
16. Ibrahim Alturki, Seokcheon Lee. The humanitarian vehicle routing problem with non-routineness of trips. 2024. Vol. 92. DOI: 101838.
17. Kristina Marintseva, Sally Dixon, Timur Yun. The Concept of creating a UAV Cargo Delivery Centre on the South Coast of England. 2024. Vol. 81. P 44–57. DOI: 101016.
18. Abderahman Rejeb, Karim Rejeb, Steve Simske, Horst Treiblmaier. Humanitarian Drones: A Review and Research Agenda. 2021. Vol. 16. DOI: 100434.

19. Leandro de Oliveira Silva, Renata Albergaria de Mello Bandeira, Vânia Barcellos Gouvêa Campos. The use of UAV and geographic information systems for facility location in a post-disaster scenario. 2017. Vol. 27. P 1137–1145. DOI: 101016.
20. Marzena Półka, Szymon Ptak, Łukasz Kuziora. The Use of UAV's for Search and Rescue Operations. 2017. Vol. 192. P 748–752. DOI: 101016.
21. Sharifah Mastura Syed Mohd Daud, Mohd Yusmiailid Putera Mohd Yusof, Chong Chin Heo, Lay See Khoo, Mansharan Kaur Chainchel Singh, Mohd Shah Mahmood, Hapizah Nawawi. Applications of drone in disaster management: A scoping review. 2022. Vol. 62. P 30–42. DOI: 101016.
22. Mollalign Yizengaw Mebrat, Muhammad Waqas Ahmed, Wim Ectors. Business Applications of Cargo Drones in the EU. 2025. Vol. 84. P 448–455. DOI: 101016.
23. Vaishnavi Upadrasta, Rodney Leitner, Astrid Oehme, Harald Kolrep. Public Acceptance of Civil Drones in Light of their Purpose. 2025. Vol. 88. P 201–208. DOI: 101016.
24. Jose Escribano Macias, Panagiotis Angeloudis, Washington Ochieng. Optimal hub selection for rapid medical deliveries using unmanned aerial vehicles. 2020. Vol. 110. P. 56–80. DOI: 101016.

ДОДАТОК А

Код програми

```
# dump all
# version
# Betaflight / STM32F405 (S405) 4.5.2 Mar 19 2025 / 03:16:02
(024f8e13d) MSP API: 1.46
# config rev: 0f78778
# start the command batch
batch start
board_name SPEEDYBEEF405V3
manufacturer_id SPBE
mcu_id 005a00413234510736363537
signature
# name: 605m
# resources
resource BEEPER 1 C05
resource MOTOR 1 B06
resource MOTOR 2 B07
resource MOTOR 3 B08
resource MOTOR 4 B09
resource MOTOR 5 NONE
resource MOTOR 6 B01
resource MOTOR 7 B05
resource MOTOR 8 NONE
resource SERVO 1 B00
resource SERVO 2 B04
resource SERVO 3 NONE
resource SERVO 4 NONE
resource SERVO 5 NONE
resource SERVO 6 NONE
resource SERVO 7 NONE
resource SERVO 8 NONE
resource LED_STRIP 1 C09
resource SERIAL_TX 1 A09
resource SERIAL_TX 2 A02
resource SERIAL_TX 3 C10
resource SERIAL_TX 4 A00
```

Безпілотний літальний апарат для виконання гуманітарних місій з використанням аналогового каналу передачі даних

```
resource SERIAL_TX 5 C12
resource SERIAL_TX 6 C06
resource SERIAL_TX 7 NONE
resource SERIAL_TX 8 NONE
resource SERIAL_TX 9 NONE
resource SERIAL_TX 10 NONE
resource SERIAL_RX 1 A10
resource SERIAL_RX 2 A03
resource SERIAL_RX 3 C11
resource SERIAL_RX 4 A01
resource SERIAL_RX 5 D02
resource SERIAL_RX 6 C07
resource SERIAL_RX 7 NONE
resource SERIAL_RX 8 NONE
resource SERIAL_RX 9 NONE
resource SERIAL_RX 10 NONE
resource INVERTER 1 NONE
resource INVERTER 2 NONE
resource INVERTER 3 NONE
resource INVERTER 4 NONE
resource INVERTER 5 NONE
resource INVERTER 6 NONE
resource INVERTER 7 NONE
resource INVERTER 8 NONE
resource INVERTER 9 NONE
resource INVERTER 10 NONE
resource INVERTER 11 NONE
resource SOFTSERIAL_TX 1 NONE
resource SOFTSERIAL_TX 2 NONE
resource SOFTSERIAL_RX 1 NONE
resource SOFTSERIAL_RX 2 NONE
resource I2C_SCL 1 NONE
resource I2C_SCL 2 B10
resource I2C_SCL 3 NONE
resource I2C_SDA 1 NONE
resource I2C_SDA 2 B11
resource I2C_SDA 3 NONE
resource LED 1 C08
```

Безпілотний літальний апарат для виконання гуманітарних місій з використанням аналогового каналу передачі даних

```
resource LED 2 NONE
resource LED 3 NONE
resource SPI_SCK 1 A05
resource SPI_SCK 2 B13
resource SPI_SCK 3 NONE
resource SPI_SDI 1 A06
resource SPI_SDI 2 B14
resource SPI_SDI 3 NONE
resource SPI_SDO 1 A07
resource SPI_SDO 2 B15
resource SPI_SDO 3 NONE
resource ESCSERIAL 1 NONE
resource CAMERA_CONTROL 1 B03
resource ADC_BATT 1 C00
resource ADC_RSSI 1 C02
resource ADC_CURR 1 C01
resource ADC_EXT 1 NONE
resource BARO_CS 1 NONE
resource BARO_EOC 1 NONE
resource BARO_XCLR 1 NONE
resource SDCARD_CS 1 A15
resource SDCARD_DETECT 1 NONE
resource PINIO 1 C03
resource PINIO 2 NONE
resource PINIO 3 NONE
resource PINIO 4 NONE
resource USB_MSC_PIN 1 NONE
resource OSD_CS 1 B12
resource GYRO_EXTI 1 C04
resource GYRO_EXTI 2 NONE
resource GYRO_CS 1 A04
resource GYRO_CS 2 NONE
resource USB_DETECT 1 NONE
resource PULLUP 1 NONE
resource PULLUP 2 NONE
resource PULLUP 3 NONE
resource PULLUP 4 NONE
resource PULLDOWN 1 NONE
```

Безпілотний літальний апарат для виконання гуманітарних місій з використанням аналогового каналу передачі даних

```
resource PULLDOWN 2 NONE
resource PULLDOWN 3 NONE
resource PULLDOWN 4 NONE
# feature
feature -RX_PPM
feature -INFLIGHT_ACC_CAL
feature -RX_SERIAL
feature -MOTOR_STOP
feature -SERVO_TILT
feature -SOFTSERIAL
feature -GPS
feature -RANGEFINDER
feature -TELEMETRY
feature -3D
feature -RX_PARALLEL_PWM
feature -RX_MSP
feature -RSSI_ADC
feature -LED_STRIP
feature -DISPLAY
feature -OSD
feature -CHANNEL_FORWARDING
feature -TRANSPONDER
feature -AIRMODE
feature -RX_SPI
feature -ESC_SENSOR
feature -ANTI_GRAVITY
feature RX_SERIAL
feature SERVO_TILT
feature TELEMETRY
feature LED_STRIP
feature OSD
feature CHANNEL_FORWARDING
feature AIRMODE
feature ESC_SENSOR
feature ANTI_GRAVITY
# serial
serial 20 1 115200 57600 0 115200
serial 0 2048 115200 57600 0 115200
```

Безпілотний літальний апарат для виконання гуманітарних місій з використанням аналогового каналу передачі даних

```
serial 1 0 115200 57600 0 115200
serial 2 0 115200 57600 0 115200
serial 3 0 115200 57600 0 115200
serial 4 1024 115200 57600 0 115200
serial 5 64 115200 57600 0 115200

# mixer
mixer QUADX
mmix reset

# servo
servo 0 500 2500 1500 100 7
servo 1 500 2000 1500 100 8
servo 2 1000 2000 1500 100 -1
servo 3 1000 2000 1500 100 -1
servo 4 1000 2000 1500 100 -1
servo 5 1000 2000 1500 100 -1
servo 6 1000 2000 1500 100 -1
servo 7 1000 2000 1500 100 -1

# servo mixer
smix reset

# beeper
beeper -GYRO_CALIBRATED
beeper -RX_LOST
beeper -RX_LOST_LANDING
beeper -DISARMING
beeper -ARMING
beeper -ARMING_GPS_FIX
beeper ARMING_GPS_NO_FIX
beeper -BAT_CRIT_LOW
beeper -BAT_LOW
beeper -GPS_STATUS
beeper -RX_SET
beeper -ACC_CALIBRATION
beeper -ACC_CALIBRATION_FAIL
beeper -READY_BEEP
beeper MULTI_BEEPS
beeper -DISARM_REPEAT
beeper -ARMED
beeper -SYSTEM_INIT
```

Безпілотний літальний апарат для виконання гуманітарних місій з використанням аналогового каналу передачі даних

```
beeper -ON_USB
beeper -BLACKBOX_ERASE
beeper -CRASH_FLIP
beeper -CAM_CONNECTION_OPEN
beeper -CAM_CONNECTION_CLOSE
beeper -RC_SMOOTHING_INIT_FAIL
# beacon
beacon -RX_LOST
beacon -RX_SET
# map
map AETR1234
# aux
aux 0 0 0 1600 2100 0 0
aux 1 1 2 1500 2100 0 0
aux 2 8 3 1375 1600 0 0
aux 3 0 0 900 900 0 0
aux 4 0 0 900 900 0 0
aux 5 0 0 900 900 0 0
aux 6 0 0 900 900 0 0
aux 7 0 0 900 900 0 0
aux 8 0 0 900 900 0 0
aux 9 0 0 900 900 0 0
aux 10 0 0 900 900 0 0
aux 11 0 0 900 900 0 0
aux 12 0 0 900 900 0 0
aux 13 0 0 900 900 0 0
aux 14 0 0 900 900 0 0
aux 15 0 0 900 900 0 0
aux 16 0 0 900 900 0 0
aux 17 0 0 900 900 0 0
aux 18 0 0 900 900 0 0
aux 19 0 0 900 900 0 0
# adjrange
adjrange 0 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 1 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 2 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 3 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 4 0 0 900 900 0 0 0 0
```

Безпілотний літальний апарат для виконання гуманітарних місій з використанням аналогового каналу передачі даних

```
adjrange 5 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 6 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 7 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 8 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 9 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 10 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 11 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 12 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 13 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 14 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 15 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 16 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 17 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 18 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 19 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 20 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 21 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 22 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 23 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 24 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 25 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 26 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 27 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 28 0 0 900 900 0 0 0 0
adjrange 29 0 0 900 900 0 0 0 0
# rxrange
rxrange 0 1000 2000
rxrange 1 1000 2000
rxrange 2 1000 2000
rxrange 3 1000 2000
# vtable
vtable bands 7
vtable channels 8
vtable band 1 A(1) A CUSTOM 5865 5845 5825 5805 5785 5765
5745 5725
vtable band 2 B(2) B CUSTOM 5733 5752 5771 5790 5809 5828
5847 5866
```

```
vtxtable band 3 E(3)      E CUSTOM  5705 5685 5665 5645 5885 5905
5925 5945
vtxtable band 4 F(4)      F CUSTOM  5740 5760 5780 5800 5820 5840
5860 5880
vtxtable band 5 R(5)      R CUSTOM  5658 5695 5732 5769 5806 5843
5880 5917
vtxtable band 6 L(6)      L CUSTOM  5362 5399 5436 5473 5510 5547
5584 5621
vtxtable band 7 X(7)      X CUSTOM  4990 5020 5050 5080 5110 5140
5170 5200
vtxtable powerlevels 4
vtxtable powervalues 14 27 30 34
vtxtable powerlabels 0,2 0,5 1 2.5
# vtx
vtx 0 1 0 0 1 900 1200
vtx 1 1 0 0 3 1300 1600
vtx 2 1 0 0 4 1800 2100
vtx 3 0 0 0 0 900 900
vtx 4 0 0 0 0 900 900
vtx 5 0 0 0 0 900 900
vtx 6 0 0 0 0 900 900
vtx 7 0 0 0 0 900 900
vtx 8 0 0 0 0 900 900
vtx 9 0 0 0 0 900 900
# rxfail
rxfail 0 a
rxfail 1 a
rxfail 2 a
rxfail 3 a
rxfail 4 h
rxfail 5 h
rxfail 6 h
rxfail 7 h
rxfail 8 h
rxfail 9 h
rxfail 10 h
rxfail 11 h
rxfail 12 h
```

```
rxfail 13 h
rxfail 14 h
rxfail 15 h
rxfail 16 h
rxfail 17 h
# master
set gyro_hardware_lpf = NORMAL
set gyro_lpf1_type = PT1
set gyro_lpf1_static_hz = 250
set gyro_lpf2_type = PT1
set gyro_lpf2_static_hz = 500
set gyro_notch1_hz = 0
set gyro_notch1_cutoff = 0
set gyro_notch2_hz = 0
set gyro_notch2_cutoff = 0
set gyro_calib_duration = 125
set gyro_calib_noise_limit = 48
set gyro_offset_yaw = 0
set gyro_overflow_detect = ALL
set yaw_spin_recovery = AUTO
set yaw_spin_threshold = 1950
set gyro_to_use = FIRST
set dyn_notch_count = 3
set dyn_notch_q = 300
set dyn_notch_min_hz = 100
set dyn_notch_max_hz = 600
set gyro_lpf1_dyn_min_hz = 250
set gyro_lpf1_dyn_max_hz = 500
set gyro_lpf1_dyn_expo = 5
set gyro_filter_debug_axis = ROLL
set acc_hardware = AUTO
set acc_lpf_hz = 25
set acc_trim_pitch = 0
set acc_trim_roll = 0
set acc_calibration = -70,-38,22,1
set baro_bustype = I2C
set baro_spi_device = 0
set baro_i2c_device = 2
```

```
set baro_i2c_address = 0
set baro_hardware = AUTO
set mid_rc = 1500
set min_check = 1050
set max_check = 1900
set rssi_channel = 0
set rssi_src_frame_errors = OFF
set rssi_scale = 100
set rssi_offset = 0
set rssi_invert = OFF
set rssi_src_frame_lpf_period = 30
set rssi_smoothing = 125
set rc_smoothing = ON
set rc_smoothing_auto_factor = 30
set rc_smoothing_auto_factor_throttle = 30
set rc_smoothing_setpoint_cutoff = 0
set rc_smoothing_feedforward_cutoff = 0
set rc_smoothing_throttle_cutoff = 0
set rc_smoothing_debug_axis = ROLL
set fpv_mix_degrees = 0
set max_aux_channels = 14
set serialrx_provider = CRSF
set serialrx_inverted = OFF
set crsf_use_negotiated_baud = OFF
set airmode_start_throttle_percent = 25
set rx_min_usec = 885
set rx_max_usec = 2115
set serialrx_halfduplex = OFF
set msp_override_channels_mask = 0
set msp_override_failsafe = OFF
set adc_device = 1
set adc_vrefint_calibration = 0
set adc_tempsensor_calibration30 = 0
set adc_tempsensor_calibration110 = 0
set blackbox_sample_rate = 1/4
set blackbox_device = SDCARD
set blackbox_disable_pids = OFF
set blackbox_disable_rc = OFF
```

```
set blackbox_disable_setpoint = OFF
set blackbox_disable_bat = OFF
set blackbox_disable_alt = OFF
set blackbox_disable_rssi = OFF
set blackbox_disable_gyro = OFF
set blackbox_disable_gyrounfilt = OFF
set blackbox_disable_acc = OFF
set blackbox_disable_debug = OFF
set blackbox_disable_motors = OFF
set blackbox_disable_rpm = OFF
set blackbox_disable_gps = OFF
set blackbox_mode = NORMAL
set blackbox_high_resolution = OFF
set min_throttle = 1070
set max_throttle = 2000
set min_command = 1000
set motor_kv = 1960
set dshot_idle_value = 550
set dshot_burst = ON
set dshot_bidir = OFF
set dshot_edt = OFF
set dshot_bitbang = AUTO
set dshot_bitbang_timer = AUTO
set use_unsynced_pwm = OFF
set motor_pwm_protocol = DSHOT600
set motor_pwm_rate = 480
set motor_pwm_inversion = OFF
set motor_poles = 14
set motor_output_reordering = 0,1,2,3,4,5,6,7
set thr_corr_value = 0
set thr_corr_angle = 800
set failsafe_delay = 15
set failsafe_off_delay = 10
set failsafe_throttle = 1000
set failsafe_switch_mode = STAGE1
set failsafe_throttle_low_delay = 100
set failsafe_procedure = DROP
set failsafe_recovery_delay = 5
```

```
set failsafe_stick_threshold = 30
set align_board_roll = 0
set align_board_pitch = 0
set align_board_yaw = 0
set gimbal_mode = NORMAL
set bat_capacity = 0
set vbat_max_cell_voltage = 430
set vbat_full_cell_voltage = 410
set vbat_min_cell_voltage = 330
set vbat_warning_cell_voltage = 350
set vbat_hysteresis = 1
set current_meter = ADC
set battery_meter = ADC
set vbat_detect_cell_voltage = 300
set use_vbat_alerts = ON
set use_cbat_alerts = OFF
set cbat_alert_percent = 10
set vbat_cutoff_percent = 100
set force_battery_cell_count = 0
set vbat_display_lpf_period = 30
set vbat_sag_lpf_period = 2
set ibat_lpf_period = 10
set vbat_duration_for_warning = 0
set vbat_duration_for_critical = 0
set vbat_scale = 110
set vbat_divider = 10
set vbat_multiplier = 1
set ibata_scale = 386
set ibata_offset = 0
set ibatv_scale = 0
set ibatv_offset = 0
set beeper_inversion = ON
set beeper_od = OFF
set beeper_frequency = 0
set beeper_dshot_beacon_tone = 1
set yaw_motors_reversed = ON
set mixer_type = LEGACY
set crashflip_motor_percent = 0
```

```
set crashflip_expo = 35
set 3d_deadband_low = 1406
set 3d_deadband_high = 1514
set 3d_neutral = 1460
set 3d_deadband_throttle = 50
set 3d_limit_low = 1000
set 3d_limit_high = 2000
set 3d_switched_mode = OFF
set servo_center_pulse = 1500
set servo_pwm_rate = 50
set servo_lowpass_hz = 0
set tri_unarmed_servo = ON
set channel_forwarding_start = 4
set reboot_character = 82
set serial_update_rate_hz = 100
set imu_dcm_kp = 2500
set imu_dcm_ki = 0
set small_angle = 25
set imu_process_denom = 2
set auto_disarm_delay = 5
set gyro_cal_on_first_arm = OFF
set gps_provider = UBLOX
set gps_sbas_mode = NONE
set gps_auto_config = ON
set gps_auto_baud = OFF
set gps_ublox_acquire_model = STATIONARY
set gps_ublox_flight_model = AIRBORNE_1G
set gps_update_rate_hz = 10
set gps_ublox_utc_standard = AUTO
set gps_ublox_use_galileo = OFF
set gps_set_home_point_once = OFF
set gps_use_3d_speed = OFF
set gps_sbas_integrity = OFF
set gps_nmea_custom_commands = -
set gps_rescue_min_start_dist = 15
set gps_rescue_alt_mode = MAX_ALT
set gps_rescue_initial_climb = 10
set gps_rescue_ascend_rate = 750
```

Безпілотний літальний апарат для виконання гуманітарних місій з використанням аналогового каналу передачі даних

```
set gps_rescue_return_alt = 30
set gps_rescue_ground_speed = 750
set gps_rescue_max_angle = 45
set gps_rescue_roll_mix = 150
set gps_rescue_pitch_cutoff = 75
set gps_rescue_imu_yaw_gain = 10
set gps_rescue_descent_dist = 20
set gps_rescue_descend_rate = 150
set gps_rescue_landing_alt = 4
set gps_rescue_disarm_threshold = 20
set gps_rescue_throttle_min = 1100
set gps_rescue_throttle_max = 1700
set gps_rescue_throttle_hover = 1275
set gps_rescue_sanity_checks = RESCUE_SANITY_FS_ONLY
set gps_rescue_min_sats = 8
set gps_rescue_allow_arwing_without_fix = OFF
set gps_rescue_throttle_p = 15
set gps_rescue_throttle_i = 15
set gps_rescue_throttle_d = 20
set gps_rescue_velocity_p = 8
set gps_rescue_velocity_i = 40
set gps_rescue_velocity_d = 12
set gps_rescue_yaw_p = 20
set deadband = 0
set yaw_deadband = 0
set yaw_control_reversed = OFF
set pid_process_denom = 1
set runaway_takeoff_prevention = ON
set runaway_takeoff_deactivate_delay = 500
set runaway_takeoff_deactivate_throttle_percent = 20
set simplified_gyro_filter = ON
set simplified_gyro_filter_multiplier = 100
set tlm_inverted = OFF
set tlm_halfduplex = ON
set hott_alarm_int = 5
set pid_in_tlm = OFF
set report_cell_voltage = OFF
set telemetry_disabled_voltage = OFF
```

```
set telemetry_disabled_current = OFF
set telemetry_disabled_fuel = OFF
set telemetry_disabled_mode = OFF
set telemetry_disabled_acc_x = OFF
set telemetry_disabled_acc_y = OFF
set telemetry_disabled_acc_z = OFF
set telemetry_disabled_pitch = OFF
set telemetry_disabled_roll = OFF
set telemetry_disabled_heading = OFF
set telemetry_disabled_altitude = OFF
set telemetry_disabled_vario = OFF
set telemetry_disabled_lat_long = OFF
set telemetry_disabled_ground_speed = OFF
set telemetry_disabled_distance = OFF
set telemetry_disabled_esc_current = ON
set telemetry_disabled_esc_voltage = ON
set telemetry_disabled_esc_rpm = ON
set telemetry_disabled_esc_temperature = ON
set telemetry_disabled_temperature = OFF
set telemetry_disabled_cap_used = ON
set ledstrip_visual_beeper = OFF
set ledstrip_visual_beeper_color = WHITE
set ledstrip_grb_rgb = GRB
set ledstrip_profile = STATUS
set ledstrip_race_color = ORANGE
set ledstrip_beacon_color = WHITE
set ledstrip_beacon_period_ms = 500
set ledstrip_beacon_percent = 50
set ledstrip_beacon_armed_only = OFF
set ledstrip_brightness = 100
set ledstrip_rainbow_delta = 0
set ledstrip_rainbow_freq = 120
set sdcard_detect_inverted = OFF
set sdcard_mode = SPI
set sdcard_spi_bus = 2
set osd_units = METRIC
set osd_warn_bitmask = 270335
set osd_rssi_alarm = 20
```

```
set osd_link_quality_alarm = 80
set osd_rssi_dbm_alarm = -60
set osd_rsnr_alarm = 4
set osd_cap_alarm = 2200
set osd_alt_alarm = 100
set osd_distance_alarm = 0
set osd_esc_temp_alarm = 0
set osd_esc_rpm_alarm = -1
set osd_esc_current_alarm = -1
set osd_core_temp_alarm = 70
set osd_ah_max_pit = 20
set osd_ah_max_rol = 40
set osd_ah_invert = OFF
set osd_logo_on_ariming = OFF
set osd_logo_on_ariming_duration = 5
set osd_tim1 = 2560
set osd_tim2 = 2561
set osd_vbat_pos = 14753
set osd_rssi_pos = 14401
set osd_link_quality_pos = 14369
set osd_link_tx_power_pos = 341
set osd_rssi_dbm_pos = 33
set osd_rsnr_pos = 341
set osd_tim_1_pos = 341
set osd_tim_2_pos = 341
set osd_remaining_time_estimate_pos = 341
set osd_flymode_pos = 14455
set osd_anti_gravity_pos = 341
set osd_g_force_pos = 341
set osd_throttle_pos = 341
set osd_vtx_channel_pos = 14389
set osd_crosshairs_pos = 312
set osd_ah_sbar_pos = 313
set osd_ah_pos = 14446
set osd_current_pos = 341
set osd_mah_drawn_pos = 14785
set osd_wh_drawn_pos = 341
set osd_motor_diag_pos = 341
```

```
set osd_craft_name_pos = 14380
set osd_pilot_name_pos = 341
set osd_gps_speed_pos = 341
set osd_gps_lon_pos = 341
set osd_gps_lat_pos = 341
set osd_gps_sats_pos = 341
set osd_home_dir_pos = 341
set osd_home_dist_pos = 341
set osd_flight_dist_pos = 341
set osd_compass_bar_pos = 341
set osd_altitude_pos = 14423
set osd_pid_roll_pos = 341
set osd_pid_pitch_pos = 341
set osd_pid_yaw_pos = 341
set osd_debug_pos = 341
set osd_power_pos = 341
set osd_pidrate_profile_pos = 341
set osd_warnings_pos = 14794
set osd_avg_cell_voltage_pos = 341
set osd_pit_ang_pos = 341
set osd_rol_ang_pos = 341
set osd_battery_usage_pos = 341
set osd_disarmed_pos = 341
set osd_nheading_pos = 341
set osd_up_down_reference_pos = 312
set osd_ready_mode_pos = 341
set osd_nvario_pos = 341
set osd_esc_tmp_pos = 341
set osd_esc_rpm_pos = 341
set osd_esc_rpm_freq_pos = 341
set osd_rtc_date_time_pos = 341
set osd_adjustment_range_pos = 341
set osd_flip_arrow_pos = 341
set osd_core_temp_pos = 341
set osd_log_status_pos = 341
set osd_stick_overlay_left_pos = 341
set osd_stick_overlay_right_pos = 341
set osd_stick_overlay_radio_mode = 2
```

```
set osd_rate_profile_name_pos = 341
set osd_pid_profile_name_pos = 341
set osd_profile_name_pos = 341
set osd_rcchannels_pos = 341
set osd_camera_frame_pos = 142
set osd_efficiency_pos = 341
set osd_total_flights_pos = 341
set osd_aux_pos = 341
set osd_sys_goggle_voltage_pos = 341
set osd_sys_vtx_voltage_pos = 341
set osd_sys_bitrate_pos = 341
set osd_sys_delay_pos = 341
set osd_sys_distance_pos = 341
set osd_sys_lq_pos = 341
set osd_sys_goggle_dvr_pos = 341
set osd_sys_vtx_dvr_pos = 341
set osd_sys_warnings_pos = 341
set osd_sys_vtx_temp_pos = 341
set osd_sys_fan_speed_pos = 341
set osd_stat_bitmask = 14124
set osd_profile = 1
set osd_profile_1_name = -
set osd_profile_2_name = -
set osd_profile_3_name = -
set osd_gps_sats_show_pdop = OFF
set osd_displayport_device = AUTO
set osd_rcchannels = -1,-1,-1,-1
set osd_camera_frame_width = 24
set osd_camera_frame_height = 11
set osd_stat_avg_cell_value = OFF
set osd_framerate_hz = 12
set osd_menu_background = TRANSPARENT
set osd_aux_channel = 1
set osd_aux_scale = 200
set osd_aux_symbol = 65
set osd_canvas_width = 30
set osd_canvas_height = 16
set osd_craftname_msgs = OFF
```

```
set system_hse_mhz = 8
set task_statistics = ON
set debug_mode = NONE
set rate_6pos_switch = OFF
set cpu_overclock = OFF
set pwr_on_arm_grace = 5
set enable_stick_ariming = OFF
set vtx_band = 1
set vtx_channel = 1
set vtx_power = 3
set vtx_low_power_disarm = OFF
set vtx_softserial_alt = OFF
set vtx_freq = 5865
set vtx_pit_mode_freq = 0
set vtx_halfduplex = ON
set vcd_video_system = PAL
set vcd_h_offset = 0
set vcd_v_offset = 0
set max7456_clock = NOMINAL
set max7456_spi_bus = 2
set max7456_preinit_opu = OFF
set displayport_msp_col_adjust = 0
set displayport_msp_row_adjust = 0
set displayport_msp_fonts = 0,1,2,3
set displayport_msp_use_device_blink = OFF
set displayport_max7456_col_adjust = 0
set displayport_max7456_row_adjust = 0
set displayport_max7456_inv = OFF
set displayport_max7456_blk = 0
set displayport_max7456_wht = 2
set esc_sensor_halfduplex = OFF
set esc_sensor_current_offset = 0
set led_inversion = 0
set camera_control_mode = HARDWARE_PWM
set camera_control_ref_voltage = 330
set camera_control_key_delay = 180
set camera_control_internal_resistance = 470
set camera_control_button_resistance = 450,270,150,68,0
```

```
set camera_control_inverted = OFF
set pinio_config = 129,1,1,1
set pinio_box = 0,255,255,255
set usb_hid_cdc = OFF
set usb_msc_pin_pullup = ON
set rcdevice_init_dev_attempts = 6
set rcdevice_init_dev_attempt_interval = 1000
set rcdevice_protocol_version = 0
set rcdevice_feature = 0
set gyro_1_bustype = SPI
set gyro_1_spibus = 1
set gyro_1_i2cBus = 0
set gyro_1_i2c_address = 0
set gyro_1_sensor_align = CW0
set gyro_1_align_roll = 0
set gyro_1_align_pitch = 0
set gyro_1_align_yaw = 0
set gyro_2_bustype = NONE
set gyro_2_spibus = 0
set gyro_2_i2cBus = 0
set gyro_2_i2c_address = 0
set gyro_2_sensor_align = DEFAULT
set gyro_2_align_roll = 0
set gyro_2_align_pitch = 0
set gyro_2_align_yaw = 0
set i2c1_pullup = OFF
set i2c1_clockspeed_khz = 800
set i2c2_pullup = OFF
set i2c2_clockspeed_khz = 800
set i2c3_pullup = OFF
set i2c3_clockspeed_khz = 800
set mco2_on_pc9 = OFF
set scheduler_relax_rx = 25
set scheduler_relax_osd = 25
set cpu_late_limit_permille = 10
set serialmsp_halfduplex = OFF
set timezone_offset_minutes = 0
set rpm_filter_harmonics = 3
```

```
set rpm_filter_weights = 100,100,100
set rpm_filter_q = 500
set rpm_filter_min_hz = 100
set rpm_filter_fade_range_hz = 50
set rpm_filter_lpf_hz = 150
set stats_min_armed_time_s = -1
set stats_total_flights = 0
set stats_total_time_s = 0
set stats_total_dist_m = 0
set craft_name = 605m
set pilot_name = -
set altitude_source = DEFAULT
set altitude_prefer_baro = 100
set altitude_lpf = 300
set altitude_d_lpf = 100
set box_user_1_name = -
set box_user_2_name = -
set box_user_3_name = -
set box_user_4_name = -
profile 0
# profile 0
set profile_name = -
set dterm_lpf1_dyn_min_hz = 75
set dterm_lpf1_dyn_max_hz = 150
set dterm_lpf1_dyn_expo = 5
set dterm_lpf1_type = PT1
set dterm_lpf1_static_hz = 75
set dterm_lpf2_type = PT1
set dterm_lpf2_static_hz = 150
set dterm_notch_hz = 0
set dterm_notch_cutoff = 0
set vbat_sag_compensation = 0
set pid_at_min_throttle = ON
set anti_gravity_gain = 80
set anti_gravity_cutoff_hz = 5
set anti_gravity_p_gain = 100
set acc_limit_yaw = 0
set acc_limit = 0
```

```
set crash_dthreshold = 50
set crash_gthreshold = 400
set crash_setpoint_threshold = 350
set crash_time = 500
set crash_delay = 0
set crash_recovery_angle = 10
set crash_recovery_rate = 100
set crash_limit_yaw = 200
set crash_recovery = OFF
set iterm_rotation = OFF
set iterm_relax = RP
set iterm_relax_type = SETPOINT
set iterm_relax_cutoff = 15
set iterm_windup = 85
set iterm_limit = 400
set pidsum_limit = 500
set pidsum_limit_yaw = 400
set yaw_lowpass_hz = 100
set throttle_boost = 5
set throttle_boost_cutoff = 15
set acro_trainer_angle_limit = 20
set acro_trainer_lookahead_ms = 50
set acro_trainer_debug_axis = ROLL
set acro_trainer_gain = 75
set p_pitch = 47
set i_pitch = 84
set d_pitch = 46
set f_pitch = 125
set p_roll = 45
set i_roll = 80
set d_roll = 40
set f_roll = 120
set p_yaw = 45
set i_yaw = 80
set d_yaw = 0
set f_yaw = 120
set angle_p_gain = 50
set angle_feedforward = 50
```

```
set angle_feedforward_smoothing_ms = 80
set angle_limit = 60
set angle_earth_ref = 100
set horizon_level_strength = 75
set horizon_limit_sticks = 75
set horizon_limit_degrees = 135
set horizon_ignore_sticks = OFF
set horizon_delay_ms = 500
set abs_control_gain = 0
set abs_control_limit = 90
set abs_control_error_limit = 20
set abs_control_cutoff = 11
set use_integrated_yaw = OFF
set integrated_yaw_relax = 200
set d_min_roll = 30
set d_min_pitch = 34
set d_min_yaw = 0
set d_max_gain = 37
set d_max_advance = 20
set motor_output_limit = 100
set auto_profile_cell_count = 0
set launch_control_mode = NORMAL
set launch_trigger_allow_reset = ON
set launch_trigger_throttle_percent = 20
set launch_angle_limit = 0
set launch_control_gain = 40
set thrust_linear = 0
set transient_throttle_limit = 0
set feedforward_transition = 0
set feedforward_averaging = OFF
set feedforward_smooth_factor = 25
set feedforward_jitter_factor = 7
set feedforward_boost = 15
set feedforward_max_rate_limit = 90
set dyn_idle_min_rpm = 0
set dyn_idle_p_gain = 50
set dyn_idle_i_gain = 50
set dyn_idle_d_gain = 50
```

```
set dyn_idle_max_increase = 150
set dyn_idle_start_increase = 50
set level_race_mode = OFF
set simplified_pids_mode = RPY
set simplified_master_multiplier = 100
set simplified_i_gain = 100
set simplified_d_gain = 100
set simplified_pi_gain = 100
set simplified_dmax_gain = 100
set simplified_feedforward_gain = 100
set simplified_pitch_d_gain = 100
set simplified_pitch_pi_gain = 100
set simplified_dterm_filter = ON
set simplified_dterm_filter_multiplier = 100
set tpa_mode = D
set tpa_rate = 65
set tpa_breakpoint = 1350
set tpa_low_rate = 20
set tpa_low_breakpoint = 1050
set tpa_low_always = OFF
set ez_landing_threshold = 25
set ez_landing_limit = 15
set ez_landing_speed = 50
# restore original profile selection
profile 0
rateprofile 0
# rateprofile 0
set rateprofile_name = -
set thr_mid = 50
set thr_expo = 0
set rates_type = BETAFLIGHT
set quickrates_rc_expo = OFF
set roll_rc_rate = 100
set pitch_rc_rate = 100
set yaw_rc_rate = 100
set roll_expo = 0
set pitch_expo = 0
set yaw_expo = 0
```

```
set roll_srate = 70
set pitch_srate = 70
set yaw_srate = 70
set throttle_limit_type = OFF
set throttle_limit_percent = 100
set roll_rate_limit = 1998
set pitch_rate_limit = 1998
set yaw_rate_limit = 1998
# restore original rateprofile selection
rateprofile 0
# save configuration
Save
```

ДОДАТОК Б

Матеріали апробації роботи

Існуючі рішення зосереджені переважно на військовому або комерційному застосуванні БПЛА. Деякі компанії реалізували пілотні проекти з доставки медикаментів у важкодоступні райони, проте масштабне застосування ще обмежене. Відомі реалізації (Zipline, Wing) орієнтовані на високовартісні системи, що не завжди доцільно у гуманітарному контексті.

Більшість відкритих платформ не враховують специфіки використання в умовах нестабільної інфраструктури. Наявні дрони часто потребують суттєвої модернізації для автономного або напівавтономного режиму польоту.

Структура гуманітарного БПЛА включає базові елементи — енергосистему, систему навігації, модулі комунікації. В основі моделі — облік вантажопідйомності, стабільності польоту, енергоспоживання та дальності. Пропонується проаналізувати підходи до реалізації алгоритмів планування маршрутів у змінних метеоумовах. Необхідно опрацювати загальні вимоги до безпеки польотів у густонаселених або небезпечних зонах. Технічна модель має бути масштабованою — для транспортування різних об'ємів вантажу. Важливою є інтеграція з системами GPS для точного позиціонування. Проведено симуляційне моделювання польоту з урахуванням типових сценаріїв застосування. Розроблено віртуальний симулятор для тестування сценаріїв гуманітарної доставки. Проведено порівняння результатів симуляції з відомими сценаріями реального використання БПЛА.

Тестування підтвердило життєздатність концепції та наявність перспектив для її розвитку. Гуманітарні дрони можуть застосовуватись у зоні стихійного лиха, військового конфлікту, медичних катастроф або під час евакуацій. У таких умовах критичною є здатність дрону здійснювати доставку без потреби в стабільній наземній інфраструктурі. Вимоги до безпеки використання БПЛА у густонаселених районах зумовлюють потребу в автономних системах уникнення перешкод.

Важливим напрямом дослідження є використання БПЛА для аерофотозйомки, створення карт зон ураження та пошуку виживших. Дрони компанії Zipline спеціалізуються на доставці медичних матеріалів у важкодоступні райони Африки. Платформи Wing (Google) та Amazon Prime Air зосереджені на комерційних доставках у розвинутих країнах. Усі відомі системи мають замкнуту архітектуру, що ускладнює адаптацію під специфічні цілі гуманітарної допомоги.

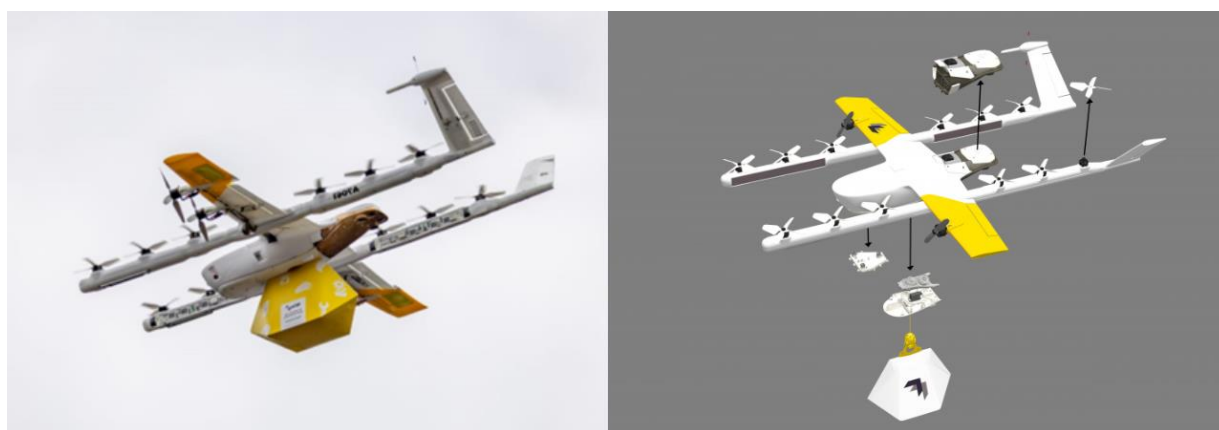


Рисунок 1 – БПЛА Wing та 3D модель для дослідження

Автовантажувач (рис. 1) являє собою Y-подібну підставку, яка легко поміщається на паркувальному місці. Оператор може прикріпити вантаж для доставки на пару гачків автовантажувача, а потім повертається до роботи. В процесі дослідження було виявлено, що оператору немає потреби чекати на прибуття дрона, оскільки БПЛА може самостійно зачепити вантаж, опустивши жовтий гачок до станції автовантажувача. Додавання автозавантажувача може здатися незначною зміною, але воно відкриває шлях для потенційно масштабного розширення вантажоперевезень дронами. Замість експлуатації ізольованих базових станцій, в майбутньому планується формування флоту дронів, які автономно відправляються по мережі станцій вантажоперевезень та зарядки, переміщуючись з одного пункту призначення в інший з мінімальним втручанням оператора. Недорогі автозавантажувачі

стимулюватимуть залучення нових роздрібних постачальників вантажів до мережі.

Було досліджено технологію автовантажувача на у міських та польових умовах. Для організації гуманітарних вантажоперевезень у містах необхідно виконувати блокування дорожніми конусами, щоб уникнути потрапляння людей чи автомобілів. У польових умовах виникають критерії непотрапляння у зону роботи гуманітарного БПЛА ще й кущів та дерев.

Вартість базових дронів комерційного класу перевищує середній бюджет волонтерських або державних ініціатив. Апарат повинен бути легко транспортований, бажано у складаному вигляді для оперативного розгортання. Основні критерії оцінки: час польоту, дальність, вантажопідйомність, точність доставки, стійкість до погодних умов. Повинна передбачатися можливість запуску з обмеженого простору — без злітної смуги. Навігаційна система має працювати з низьким рівнем сигналу GPS або в умовах його повної відсутності. Планується використання модульної конструкції для полегшення обслуговування та ремонту. Акумуляторна система повинна мати можливість швидкої заміни у польових умовах. Захист електроніки має бути забезпечений герметизацією корпусу та використанням фільтрів для стабілізації напруги. Камера або тепловізор — як опціональне оснащення для виявлення людей чи об'єктів під час місій пошуку.

Напрямок гуманітарного вантажоперевезення за допомогою БПЛА сьогодні залишається обмеженою регуляторами, які обмежують його розширення кількома групами, але правила розвиваються разом із розвитком технологій.

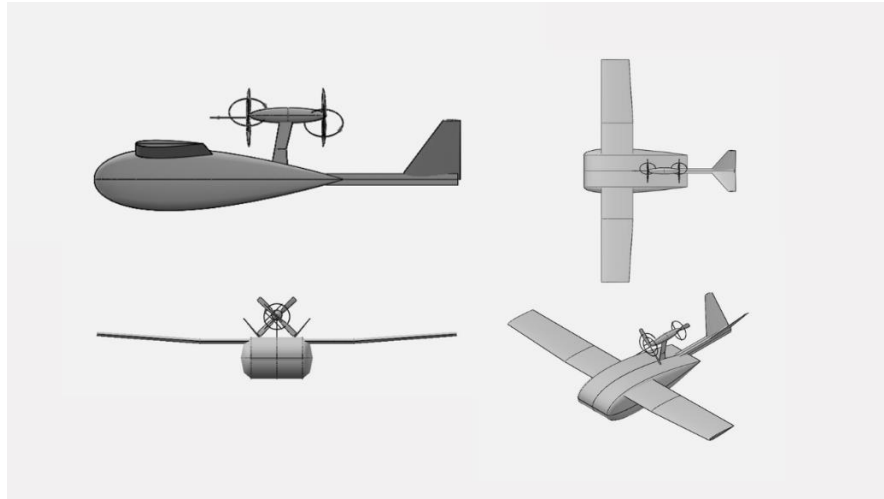


Рисунок 2 – Запропонована модель прототипу для симуляційного тестування

Висновки. У майбутньому прототипі (рис. 2) можлива інтеграція ШІ для аналізу ландшафту й планування оптимальних маршрутів. Встановлення механізмів автоматичного розпізнавання майданчика для посадки дозволить підвищити автономність. Використання альтернативних джерел живлення (наприклад, сонячних панелей) може збільшити тривалість місій. Передбачено інтеграцію з геоінформаційними системами (GIS) для підтримки точного картографування районів дії.

Запропонована концепція демонструє високу адаптивність до задач гуманітарного характеру. Проект має потенціал для масштабування та локалізації під конкретні завдання. Подальші дослідження доцільно зосередити на виборі матеріалів, оптимізації енергоспоживання та автономізації. Необхідно проводити пілотні впровадження у співпраці з гуманітарними організаціями. Можливе застосування результатів для інших цивільних задач — моніторинг, пошукові операції, агровикористання. Доцільно вивчити регуляторні аспекти використання БПЛА у кризових регіонах.