

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри
 Черно О.О.
«16» 06 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

на тему: «Розробка інспекційного повітряного робота»

Виконав: студент 4347ст групи


(підпис)

Крамаренко Р.С.

Керівник роботи:

доцент кафедри КСУ, к.т.н., доцент
(посада, науковий ступень вчене звання)


(підпис)

Герасін О.С.

м. Миколаїв – 2025 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ННІ автоматики і електротехніки
Кафедра комп'ютеризованих систем управління
Рівень вищої освіти бакалавр
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри КСУ

Черно О.О.
« » 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Крамаренку Роману Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: розробка інспекційного повітряного робота
керівник роботи Герасін Олександр Сергійович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від «23» 04 2025 р. № УЧ - 343
2. Строк подання студентом роботи 09.06.2025
3. Вихідні дані до роботи Розробити інспекційний повітряний робот
на базі відкритої FPV-платформи з використанням карбонової рами, безколекторних
моторів, польотного контролера з прошивкою Betaflight, аналогової FPV-системи,
далекобійної системи радіокерування та GPS-модуля для візуального огляду об'єктів
інфраструктури.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Аналіз предметної області повітряних роботів.
Вибір апаратних засобів реалізації системи керування повітряним роботом.
Складання конструкції та підключення системи керування повітряного дрона.
Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Аналіз предметної області повітряних робіт

Мета та задачі роботи

Функціональна схема наземної станції та бортової системи

Принципові схеми контролера польоту та регулятора обертів

Схема організації каналів передачі сигналів керування та відео

Результати розробки

Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Герасін О.С., доцент каф. КСУ</i>	12.05.2025	26.05.2025

7. Дата видачі завдання: «12» 02 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів підготовки кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Аналіз предметної області повітряних робіт	18.04.2025	виконано
2	Вибір апаратних засобів реалізації системи керування повітряним роботом	28.04.2025	виконано
3	Складання конструкції та підключення системи керування повітряного дрона	15.05.2025	виконано
4	Охорона праці	26.05.2025	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	06.06.2025	виконано

Студент


(підпис)

Крамаренко Р.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Герасін О.С.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Результатом виконання кваліфікаційної роботи є розроблений, зібраний та первинно випробуваний інспекційний повітряний робот типу квадрокоптер на базі відкритої FPV-платформи. Створений апарат призначений для візуального огляду об'єктів інфраструктури з близької відстані, забезпечуючи оператора якісною візуальною інформацією в реальному часі за допомогою аналогової FPV-системи з високою роздільною здатністю та низькою затримкою. Конструкція дрона передбачає використання карбонової рами, потужних безколекторних моторів, сучасного польотного контролера з прошивкою Betaflight, далекобійної системи радіокерування на частоті 915 МГц та GPS-модуля для реалізації навігаційних функцій та підвищення безпеки польотів.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз предметної області повітряних роботів та їх застосування для інспекційних завдань; проведено вибір апаратних компонентів для бортової системи та наземної станції оператора; розроблено функціональну та принципові схеми підключення; здійснено механічну збірку конструкції та монтаж електронних компонентів. Також проведено базове програмне налаштування польотного контролера та регуляторів обертів, конфігурацію режимів польоту та GPS-функцій, а також первинні стендові та польотні випробування для оцінки працездатності та базових льотних характеристик розробленого інспекційного дрона. Розглянуто питання охорони праці при роботі з подібними апаратами.

Кваліфікаційну роботу виконано на 93 сторінках машинописного тексту, що містить: 55 рисунків, 18 таблиць, список використаних джерел з 13 найменувань та 2 додатки.

Робота викладена українською мовою.

Ключові слова: інспекційний повітряний робот, БПЛА, дрон, FPV-платформа, Betaflight, візуальна інспекція, польотний контролер, GPS-навігація, радіокерування.

SUMMARY

The result of this qualification work is a developed, assembled, and initially tested inspection aerial robot of the quadcopter type, based on an open FPV platform. The created apparatus is designed for close-range visual inspection of infrastructure objects, providing the operator with high-quality real-time visual information via an analog FPV system with high resolution and low latency. The drone's design involves the use of a carbon fiber frame, powerful brushless motors, a modern flight controller with Betaflight firmware, a long-range 915 MHz radio control system, and a GPS module for implementing navigation functions and enhancing flight safety.

In the course of the qualification work, an analysis of the subject area of aerial robots and their application for inspection tasks was conducted; the selection of hardware components for the onboard system and the operator's ground station was conducted; functional and principal connection diagrams were developed; and mechanical assembly of the structure, cottura and installation of electronic components were carried out. Basic software setup of the flight controller and ESCs, configuration of flight modes and GPS functions, as well as initial bench and flight tests to assess the operability and basic flight characteristics of the developed inspection drone were also performed. Occupational safety issues when working with such devices were considered.

The qualification work consists of 93 pages of typewritten text, containing: 55 figures, 18 tables, a list of 13 cited sources, and 2 appendices.

The work is presented in Ukrainian.

Keywords: inspection aerial robot, UAV, drone, FPV platform, Betaflight, visual inspection, flight controller, GPS navigation, radio control.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ПОВІТРЯНИХ РОБОТІВ	10
1.1 Повітряні роботи	10
1.2 Методи керування, навігації та забезпечення безпеки польотів.....	14
1.3 Вимоги до інспекційних дронів при огляді інфраструктури.....	17
1.4 Дослідження існуючих проєктів.....	20
1.5 Постановка задачі розробки інспекційного повітряного робота	27
1.6 Висновок за розділом 1.....	30
РОЗДІЛ 2 ВИБІР АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РОБОТОМ.....	33
2.1 Аналіз вимог до апаратних компонентів інспекційного дрона.....	33
2.2 Вибір апаратних компонентів дрона.....	33
2.2.1 Рама	33
2.2.2 Стек.....	34
2.2.3 Мотори	36
2.2.4 Пропелери	37
2.2.5 Камера	38
2.2.6 Передавач відео	38
2.2.7 Акумулятор.....	39
2.2.8 FPV Антена.....	40
2.2.9 Приймач радіокерування.....	41
2.2.10 Бузер	42
2.2.11 GPS-модуль.....	42
2.3 Вибір комплектуючих для наземної станції оператора	43
2.3.1 Апаратура радіокерування	43
2.3.2 Відеошолом FPV	45
2.3.3 Зарядний пристрій	46
2.4 Розробка функціональної та принципової схем системи.....	47
2.4.1 Функціональна схема наземної станції та бортової системи	47

2.4.2 Принципові схеми контролера польоту та регулятора обертів	47
2.4.3 Схема організації каналів передачі сигналів керування та відео ...	49
2.4.4 Схема підключення додаткових модулів до польотного контролера	50
2.5 Висновок за розділом 2.....	51
РОЗДІЛ 3 СКЛАДАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДКЛЮЧЕННЯ СИСТЕМИ	
КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ДРОНА.....	53
3.1 Необхідні інструменти та матеріали для складання та паяння	53
3.2 Збірка конструктивних компонентів.....	54
3.2.1 Збірка рами Mark4 V2 7"	54
3.2.2 Монтаж на раму двигунів EMAX ECO II 2807 6S 1300KV.....	55
3.3 Монтаж та підключення електронних компонентів системи.....	56
3.3.1 Монтаж стеку та паяння силових ланцюгів	56
3.3.2 Монтаж польотного контролера та підключення периферійних модулів	57
3.3.3 Фінальні перевірки та збірка конструкції	60
3.4 Базове програмне налаштування польотного контролера у Betaflight Configurator	61
3.4.1 Калібрування акселерометра та гіроскопа	61
3.4.2 Налаштування портів (UARTs)	62
3.5 Конфігурація основних параметрів контролера польоту та ESC	62
3.5.1 Оновлення та налаштування прошивки ESC у BLHeli Configurator	62
3.5.2 Налаштування параметрів ESC у Betaflight	63
3.5.3 Налаштування режимів польоту	64
3.6 Налаштування GPS-модуля та пов'язаних функцій.....	64
3.7 Методика та результати комплексного тестування інспекційного повітряного дрона	64
3.7.1 Стендові випробування	64
3.7.2 Тестування базових польотних характеристик у приміщенні	64

3.8 Висновок за розділом 3.....	67
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	70
4.1 Аналіз потенційних небезпек та шкідливих факторів	70
4.2 Заходи безпеки при складанні та налаштуванні дрона	71
4.3 Забезпечення безпеки під час тестових польотів та загальні заходи пожежної безпеки.....	72
4.4 Висновок за розділом 4.....	73
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76
ДОДАТОК А. СКРІНШОТИ НАЛАШТУВАНЬ ПОЛЬОТНОГО КОНТРОЛЕРА У BETAFLIGHT CONFIGURATOR (РЕЖИМ ЕКСПЕРТА).....	78
A.1 Вкладка «Налаштування».....	78
A.2 Вкладка «Порти»	79
A.3 Вкладка «Конфігурація».....	79
A.4 Вкладка «Живлення та акумулятор».....	80
A.5 Вкладка «Безаварійність».....	81
A.6 Вкладка «Налаштування ПІД».....	82
A.7 Вкладка «Приймач»	83
A.8 Вкладка «Режими»	84
A.9 Вкладка «GPS»	85
A.10 Вкладка «Мотори»	86
A.11 Вкладка «Наекранне меню»	86
A.12 Вкладка «Відеопередавач».....	87
A.13 Вкладка «Датчики»	88
A.14 Вкладка «Журналювання через кабель».....	89
A.15 Вкладка «Чорна скриня»	89
A.16 Вкладка «Командний рядок»	90
ДОДАТОК Б. Бекап налаштувань дрона	91

ВСТУП

Сучасний світ характеризується стрімким розвитком технологій, серед яких повітряні роботи, або безпілотні літальні апарати (БПЛА), займають дедалі важливіше місце. Їхня здатність виконувати завдання у важкодоступних, небезпечних або рутинних умовах робить їх незамінними інструментами у багатьох галузях – від військової справи та безпеки до сільського господарства, логістики та наукових досліджень [1, 4]. Одним із найбільш перспективних та динамічно зростаючих напрямків застосування БПЛА є інспекція різноманітних об'єктів та інфраструктури.

Традиційні методи інспектування промислових споруд, мостів, ліній електропередач, вітрогенераторів, будівель та інших об'єктів часто пов'язані зі значними часовими та фінансовими витратами, а також з високими ризиками для персоналу, особливо при роботі на висоті або у небезпечних середовищах [9]. Використання інспекційних повітряних роботів дозволяє суттєво оптимізувати ці процеси, забезпечуючи швидкий, безпечний та детальний збір візуальної та іншої сенсорної інформації. Переваги використання дронів для інспекційних сценаріїв, такі як скорочення часу та зниження ризиків, є надто значними, щоб не шукати ефективних рішень у цій галузі [9].

Попри наявність на ринку різноманітних комерційних БПЛА, багато з них орієнтовані на загальні завдання аерофотозйомки і не завжди відповідають специфічним вимогам інспекційних місій, особливо коли йдеться про огляд внутрішніх просторів або отримання зображень з нетипових ракурсів, наприклад, огляд стель чи вертикальних поверхонь з близької відстані [9]. Це створює потребу в розробці спеціалізованих інспекційних дронів, адаптованих під конкретні умови та завдання.

Очікується, що результати даної кваліфікаційної роботи дозволять отримати функціональний прототип інспекційного дрона, а також накопичити практичний досвід у проектуванні та реалізації подібних систем.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ПОВІТРЯНИХ РОБОТІВ

1.1 Повітряні роботи

Повітряні роботи, широко відомі як безпілотні літальні апарати (БПЛА) або дрони, за останні десятиліття пройшли шлях від вузькоспеціалізованих військових розробок до багатофункціональних інструментів, що знаходять застосування у численних сферах людської діяльності [1, 4]. Їхня здатність виконувати польоти без безпосередньої присутності пілота на борту, оперувати в небезпечних, важкодоступних або рутинних умовах, а також збирати різноманітні дані, зумовила їх стрімкий розвиток та інтеграцію в сучасний технологічний ландшафт. Ключовими перевагами використання БПЛА є підвищення ефективності, зниження ризиків для людини, скорочення часових та фінансових витрат на виконання багатьох завдань.

Історично, перші концепції та реалізації безпілотних літальних апаратів були тісно пов'язані з військовими потребами. Починаючи з розвідувальних місій та використання як мішеней для тренувань ППО, технології БПЛА поступово вдосконалювалися, розширюючи спектр виконуваних завдань до спостереження в реальному часі, цілевказання та навіть нанесення високоточних ударів без загрози для життя пілотів [1]. Цей військовий імпульс став каталізатором для розвитку ключових технологій, таких як системи дистанційного керування, автономної навігації, мініатюризації сенсорів та покращення льотно-технічних характеристик.

З часом, завдяки здешевленню компонентної бази, прогресу в мікроелектроніці, програмному забезпеченні та системах зв'язку, повітряні роботи стали доступними і для цивільного використання. Це відкрило величезний потенціал для їх застосування у комерційній сфері, наукових дослідженнях, сільському господарстві (точне землеробство, моніторинг посівів), картографії та геодезії (створення високоточних карт та 3D-моделей

місцевості), моніторингу навколишнього середовища (контроль за станом лісів, водних ресурсів, виявлення забруднень), логістиці (доставка вантажів), медіаіндустрії (аерофото- та відеозйомка), будівництві (контроль за ходом робіт, інспекція конструкцій) та навіть у сфері розваг [1, 4]. Одним з найбільш динамічно зростаючих та затребуваних напрямків стало використання БПЛА для інспекції різноманітних об'єктів та інфраструктури, де вони дозволяють суттєво оптимізувати процеси, підвищити безпеку та деталізацію огляду.

Сучасні БПЛА демонструють значне конструктивне та функціональне різноманіття. Їх класифікують за низкою ознак, основними з яких є конструкція, розмір, маса, тривалість польоту та призначення. За конструктивним виконанням (Рис. 1.1) виділяють:

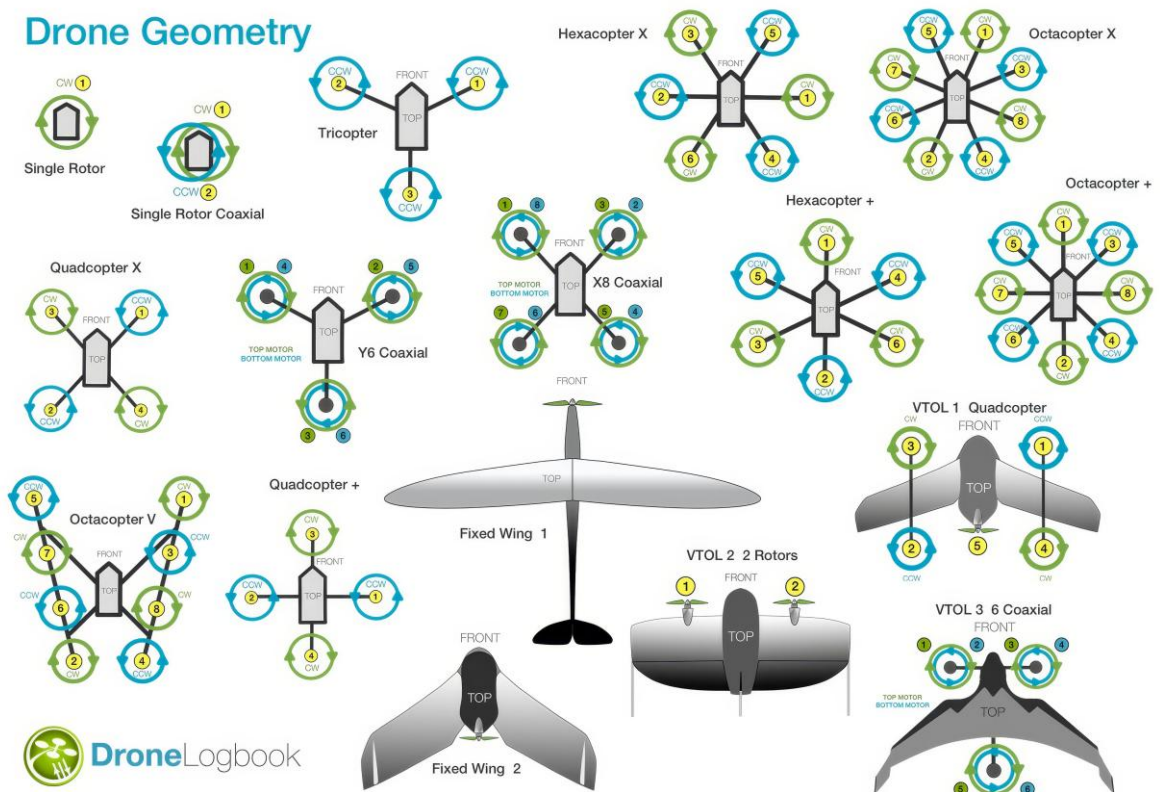


Рис. 1.1 – Класифікація дронів за конструкцією

– мультироторні системи (квадрокоптери, гексакоптери, октокоптери тощо) – найпоширеніший тип БПЛА, особливо у споживчому сегменті та для завдань, що вимагають зависання та маневреності у обмеженому просторі. Вони забезпечують вертикальний зліт та посадку (VTOL), що робить їх зручними для експлуатації з невідготовлених майданчиків. Принцип їхнього польоту базується

на зміні швидкості обертання кількох (від трьох і більше) несучих гвинтів, розташованих в одній площині [3]. Саме такі системи найчастіше використовуються для візуальної інспекції об'єктів з близької відстані завдяки їхній стабільності та маневреності. Однак, їхнім основним недоліком є відносно невеликий час польоту через високе енергоспоживання рушійної системи.

– БПЛА літакового типу (з нерухомим крилом) – ці апарати створюють підйомну силу за рахунок аеродинамічних властивостей крила при поступальному русі, подібно до традиційних літаків. Їхньою головною перевагою є значно більша тривалість польоту та здатність долати великі відстані з вищою швидкістю [4]. Це робить їх ефективними для моніторингу протяжних об'єктів (трубопроводи, ЛЕП), картографування великих територій або виконання завдань на значній відстані. Проте, вони зазвичай потребують злітно-посадкової смуги або спеціальних засобів для запуску (катапульта) та посадки (парашут) і не здатні зависати на місці, що обмежує їхнє застосування для детальної статичної інспекції.

– гібридні БПЛА – конструкції, що прагнуть поєднати переваги мультироторних систем та апаратів літакового типу. Часто вони реалізовані за концепцією VTOL (Vertical Take-Off and Landing) [7], маючи можливість вертикального зльоту та посадки, а потім переходу в режим горизонтального польоту з використанням підйомної сили крила (наприклад, конвертоплани, апарати з поворотними гвинтами – tiltrotor, або апарати з окремими підйомними та маршовими двигунами). Гібридні системи є перспективними для завдань, що вимагають як можливості зависання, так і значної дальності чи тривалості польоту, але їхня конструкція та системи керування, як правило, є значно складнішими та дорожчими.

– інші типи – існують також менш поширені, але специфічні конструкції, такі як БПЛА вертолітного типу (з одним несучим гвинтом та хвостовим гвинтом), орнітоптери (що імітують політ птахів шляхом махання крилами) та інші експериментальні розробки.

За розміром та масою БПЛА також поділяються на різні категорії, від мікро- та міні-дронів вагою в десятки або сотні грамів до великих апаратів злітною масою в сотні або навіть тисячі кілограмів (класифікація може відрізнятися в різних стандартах, наприклад, класифікація НАТО або FAA [4]).

Для інспекційних завдань (Рис. 1.2) БПЛА повинні відповідати специфічним вимогам, що включають високу стабільність польоту для отримання чітких зображень, точне позиціонування для геоприв'язки даних та можливості повторних обльотів, високу маневреність для роботи в складних умовах поблизу об'єктів, наявність якісної оптики (часто з можливістю встановлення тепловізорів, мультиспектральних камер або інших спеціалізованих сенсорів), надійний канал зв'язку для передачі даних та команд керування, а також достатній час польоту для виконання інспекційної сесії без частотої заміни акумуляторів. Саме ці вимоги визначають подальший вибір конкретних апаратних та програмних рішень при проектуванні інспекційного дрона.

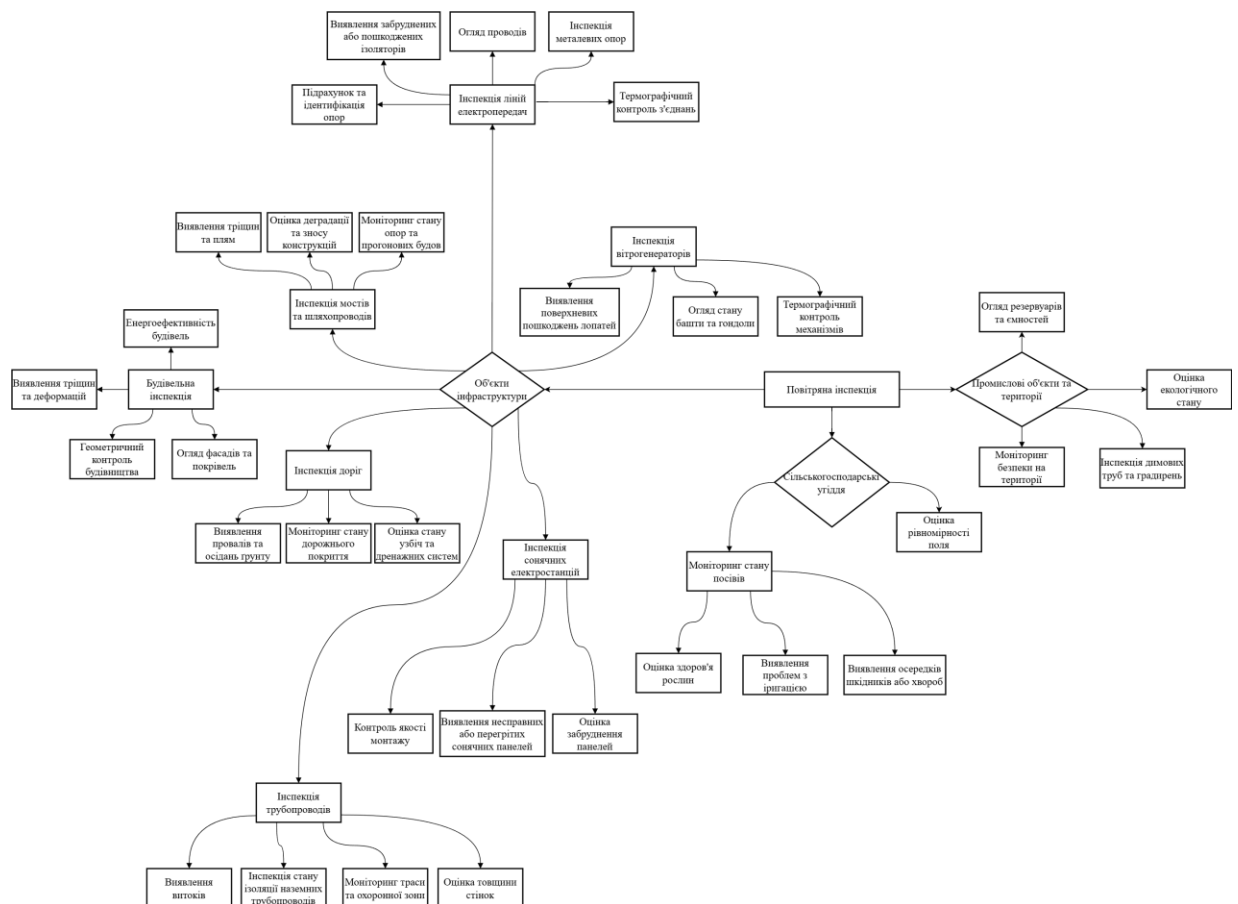


Рис. 1.2 – Типові сфери повітряної інспекції

1.2 Методи керування, навігації та забезпечення безпеки польотів

Ефективність, надійність та безпека застосування повітряних роботів безпосередньо залежать від досконалості систем, що забезпечують їхнє керування, навігацію у просторі та запобігання аварійним ситуаціям. Сучасні БПЛА використовують широкий спектр технологій та підходів, починаючи від безпосереднього ручного керування оператором і закінчуючи складними автономними алгоритмами, що дозволяють апаратам виконувати завдання з мінімальним втручанням людини. Розуміння принципів роботи цих систем є ключовим для вибору оптимальної конфігурації дрона та стратегії його використання.

Методи керування повітряними роботами можна умовно розділити на ручні та автоматизовані/автономні.

Ручне керування передбачає безпосередній контроль оператора над рухом та орієнтацією дрона в реальному часі за допомогою спеціалізованої апаратури радіокерування [5, 6].

– Керування в межах прямої видимості (LOS – Line of Sight) – історично перший та найпростіший метод, при якому оператор візуально спостерігає за дроном з землі. Цей метод не потребує складного обладнання для передачі відео, але має суттєві обмеження за дальністю ефективного керування та точністю позиціонування, особливо для невеликих апаратів або при огляді деталей на відстані. Складність оцінки ракурсу та відстані до об'єкта, а також вплив погодних умов на видимість є його основними недоліками.

– Керування з видом від першої особи (FPV – First-Person View) – значно більш прогресивний метод, що забезпечує оператору ефект присутності «в кабіні» дрона [2]. Відеозображення з бортової камери в реальному часі транслюється на спеціальні відеошоломи або монітори. Це дозволяє здійснювати значно точніші та складніші маневри, особливо поблизу об'єктів інспекції, та потенційно літати за межами прямої видимості (BVLOS), хоча остання можливість часто обмежується законодавством. Для FPV-польотів критично

важливою є низька затримка відеосигналу та його стабільність, що залежить від якості камери, відеопередавача та антен [2, 6]. Хоча FPV забезпечує краще занурення, недосвідчений оператор може зіткнутися з «тунельним зором» та втратою загальної просторової орієнтації.

Автоматизовані та автономні режими польоту значно розширюють функціональні можливості БПЛА, підвищують безпеку та спрощують виконання складних або рутинних завдань [4, 8]. Ці режими базуються на обробці даних з різноманітних бортових сенсорів польотним контролером.

– GPS-навігація та пов'язані функції – використання сигналів від глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) є основою для багатьох автоматизованих режимів.

Утримання позиції (Position Hold / Loiter) – дрон автоматично утримує свої поточні географічні координати та висоту, компенсуючи вплив вітру. Це досягається завдяки постійному аналізу даних GPS, барометричного висотоміра та інерційних датчиків (IMU – акселерометр та гіроскоп) [8]. Цей режим незамінний для статичного огляду під час інспекції.

Політ за заданими точками (Waypoint Navigation) – оператор може заздалегідь спланувати маршрут, вказавши послідовність маршрутних точок, висоту, швидкість та дії в кожній точці (наприклад, фотографування). Дрон автоматично проходить заданий маршрут, що ефективно для інспекції протяжних об'єктів або для повторюваних місій.

Автоматичне повернення до точки старту (Return To Home - RTH) – важлива функція безпеки, що активується оператором або автоматично при втраті зв'язку, низькому заряді акумулятора тощо. Дрон самостійно повертається до точки зльоту та здійснює посадку [4].

– Інші автоматизовані режими – до них належать автоматичний зліт та посадка, що спрощують ці етапи для оператора; політ по орбіті навколо заданої точки інтересу (Point of Interest / Orbit mode), зручний для всебічного огляду статичних об'єктів; та режим слідування (Follow Me), де дрон автоматично слідує за рухомим об'єктом або оператором.

– Автономні польоти – важливо розрізняти автоматизовані режими, де оператор зберігає загальний контроль, та повністю автономні, де БПЛА самостійно приймає рішення на основі програми та даних сенсорів для виконання всієї місії без втручання людини [4]. Розробка таких систем є складним завданням, що активно розвивається завдяки прогресу в галузі штучного інтелекту та машинного навчання.

Навігаційні системи БПЛА відповідають за точне визначення його поточного стану (координати, швидкість, висота, орієнтація). Окрім вже згаданої GNSS, до ключових навігаційних сенсорів належать:

– інерційний вимірювальний блок (IMU) – включає акселерометри (вимірюють лінійні прискорення) та гіроскопи (вимірюють кутові швидкості). Дані з IMU є основою для стабілізації польоту та короткострокового визначення орієнтації.

– магнітометр (компас) – визначає напрямок на магнітний полюс Землі, що дозволяє визначати курс (напрямок руху) дрона. Важливий для навігації за GPS та утримання напрямку.

– барометричний висотомір (барометр) – вимірює атмосферний тиск для визначення відносної висоти польоту. Допомогає утримувати висоту, особливо в режимі зависання.

– системи візуальної одометрії та SLAM – більш складні системи, що використовують дані з бортових камер (іноді в поєднанні з іншими сенсорами, наприклад, лідарами) для одночасного визначення траєкторії руху дрона та побудови карти навколишнього середовища. Це дозволяє дронам орієнтуватися в умовах відсутності або недоступності GPS-сигналу (наприклад, всередині приміщень).

Системи уникнення перешкод є критично важливим компонентом для забезпечення безпеки польотів, особливо при інспекціях поблизу об'єктів або в невідомому середовищі [4]. Ці системи використовують різні типи сенсорів для виявлення потенційних перешкод:

– ультразвукові сенсори (сонари) – ефективні на коротких дистанціях для виявлення великих об’єктів [8].

– інфрачервоні (ІЧ) сенсори – також працюють на невеликих відстанях.

– оптичні сенсори (стерео- та монокулярні камери) – дозволяють виявляти перешкоди на більших відстанях та потенційно розпізнавати їх тип, але їхня робота залежить від освітлення.

– лідари (LIDAR) – створюють точну 3D-карту оточення за допомогою лазерного сканування, працюють незалежно від освітлення, але є дорогими.

– часопротітні (ToF) камери – вимірюють відстань до об’єктів на основі часу проходження світлового імпульсу, за допомогою них можна зменшити залежність від вмінь оператора, дрон зможе зависати на одній висоті, без застосувань GPS.

При виявленні перешкоди система може автоматично зупинити дрон, змінити його траєкторію або попередити оператора. Ефективність таких систем залежить від типу та кількості сенсорів, а також від досконалості алгоритмів обробки даних.

Комплексне використання сучасних методів керування, точних навігаційних систем та надійних систем безпеки дозволяє значно розширити можливості застосування БПЛА, роблячи їх більш ефективними, автономними та безпечними інструментами для виконання широкого кола завдань, включаючи складні інспекційні місії.

1.3 Вимоги до інспекційних дронів при огляді інфраструктури

Інспекція об’єктів інфраструктури за допомогою повітряних роботів є складним та відповідальним завданням, що висуває низку специфічних вимог як до самих дронів, так і до методів їхнього керування. На відміну від польотів на відкритій місцевості або виконання завдань, що не потребують високої точності наближення, інспекційні місії часто пов’язані з роботою в умовах обмеженого простору, наявності численних перешкод, потенційних електромагнітних завад

та необхідності отримання деталізованих даних з близької відстані [9]. Успішне виконання таких завдань залежить від ретельного врахування цих особливостей на етапах проєктування, вибору компонентів та налаштування інспекційного дрона. Нижче наведено ключові вимоги, яким повинен відповідати ефективний інспекційний БПЛА:

– висока стабільність польоту та точне позиціонування – фундаментальна вимога, необхідна для отримання чітких, нерозмитих візуальних даних та для безпечного маневрування поблизу інспектованих конструкцій. Дрон повинен вміти стабільно зависати (hover) навіть за наявності помірного вітру, а також плавно реагувати на команди керування. Досягнення високої стабільності залежить від якості польотного контролера та його налаштувань (зокрема, PID-регуляторів), збалансованості рушійної системи (мотори та пропелери), жорсткості рами та мінімізації вібрацій. Точне позиціонування, що забезпечується GNSS (GPS) системами (за потреби з підтримкою RTK для підвищеної точності) або системами візуальної одометрії, є важливим для повторюваності інспекцій, геоприв'язки зібраних даних та безпечної роботи автоматизованих режимів польоту. Для FPV-дронів, де оператор покладається на власні навички, стабільна платформа дозволяє легше виконувати точні маневри.

– Можливість безпечного польоту на близьких відстанях до об'єктів – для детального візуального огляду та виявлення дрібних дефектів (тріщин, корозії, пошкоджень) дрон повинен мати можливість безпечно наближатися до інспектованих поверхонь. Це висуває вимоги до високої маневреності апарата, швидкої реакції на команди керування та, в ідеалі, наявності систем уникнення перешкод (хоча для FPV-дронів, орієнтованих на ручне керування, основна відповідальність лежить на пілоті). Конструкція рами та розміщення компонентів повинні враховувати потенційні аеродинамічні ефекти, що виникають при польоті поблизу масивних об'єктів («ефект землі», «ефект стіни»). У деяких випадках може бути доцільним використання захисних елементів для пропелерів або всієї конструкції.

– Якісна система візуалізації (FPV-камера та відеопередача) – для візуальної інспекції ключове значення має якість зображення, що отримує оператор.

Характеристики FPV-камери – вимагається камера з достатньою роздільною здатністю (для аналогових систем – високий показник TVL, наприклад, 1500TVL), широким динамічним діапазоном (WDR) для роботи в умовах контрастного освітлення, високою світлочутливістю для інспекції в затінених місцях або при недостатньому освітленні, а також оптимальним кутом огляду (FOV), що забезпечує як достатнє охоплення сцени, так і можливість розрізняти деталі. Важливою є також мінімальна затримка відеосигналу (latency) для забезпечення точного та своєчасного реагування оператора [2].

– Надійність відеоканалу – система передачі відеосигналу (VTX та антени) повинна забезпечувати стабільний та чистий сигнал на робочих відстанях інспекції, бути стійкою до радіоперешкод, які часто присутні на промислових об'єктах. Вибір оптимальної робочої частоти (наприклад, 5.8 ГГц для аналогових систем) та потужності відеопередавача, а також використання якісних антен з круговою поляризацією, є критичними факторами.

– Достатній час польоту (автономність) – дрон повинен мати можливість перебувати у повітрі достатньо довго для виконання запланованого обсягу інспекційних робіт без необхідності частої заміни акумуляторів. Це залежить від ємності акумулятора, загальної ваги дрона та ефективності його рушійної системи. Для FPV-дронів інспекційного класу бажаний час польоту становить не менше 15-20 хвилин.

– Маневреність та керованість – інспекційний дрон повинен мати високу маневреність для обльоту складних конструктивних елементів, роботи у вузьких просторах та точного позиціонування камери. Реакція на команди керування має бути плавною та передбачуваною. Для FPV-дронів, де керування здійснюється вручну, ці характеристики є особливо важливими.

– Міцність та надійність конструкції – дрон повинен бути виготовлений з міцних, але легких матеріалів (наприклад, карбону), здатних витримувати

експлуатаційні навантаження та потенційні незначні зіткнення (особливо при інспекції у складних умовах). Надійність електронних компонентів та якість їх монтажу також є пріоритетом.

– Можливість встановлення та живлення додаткових датчиків (у перспективі) – хоча базовим інструментом є візуальна камера, конструкція дрона повинна, за можливості, передбачати встановлення додаткових сенсорів у майбутньому (наприклад, компактних тепловізорів, датчиків газу тощо), а система живлення – мати певний запас потужності для їх підключення.

– Простота обслуговування та ремонтпридатність – можливість швидкого доступу до основних компонентів для обслуговування або заміни у разі пошкодження є важливою для професійного використання.

– Стійкість до електромагнітних завад – при роботі поблизу промислового обладнання або ліній електропередач дрон та його системи зв'язку повинні демонструвати стійкість до електромагнітних перешкод.

Дотримання цих специфічних вимог дозволяє створювати ефективні та безпечні повітряні роботи, здатні якісно виконувати завдання інспекції різноманітних об'єктів інфраструктури.

1.4 Дослідження існуючих проєктів

Ринок повітряних роботів, призначених для інспекційних завдань, сьогодні пропонує широкий спектр рішень, що умовно можна розділити на три основні категорії: готові комерційні платформи, кастомні системи, зібрані на базі відкритих апаратних та програмних компонентів, та дослідницькі проєкти, що часто поєднують елементи обох підходів. Аналіз цих рішень дозволяє виявити актуальні тенденції, оцінити переваги та недоліки різних концепцій та визначити оптимальні шляхи для розробки спеціалізованих інспекційних дронів.

Комерційні інспекційні дрони зазвичай пропонують інтегровані рішення «під ключ», що включають сам літальний апарат, спеціалізовані сенсори (високоякісні камери, тепловізори, лідари), програмне забезпечення для

планування місій та аналізу даних, а також сервісну підтримку. Такі системи часто вирізняються високою надійністю, продуманою ергономікою та наявністю сертифікації для виконання робіт у певних галузях. Прикладами таких платформ є DJI Matrice 30 Series (Рис. 1.3), що поєднує портативність із мультисенсорною системою та захистом IP55; Skydio X10D (Рис. 1.4), відомий своїми передовими можливостями автономної навігації та уникнення перешкод; та Flyability ELIOS 3 (Рис. 1.5), спеціально розроблений для безпечної роботи у замкнених та важкодоступних просторах завдяки своїй захисній сферичній клітці та інтегрованому лідару. Однак, вартість таких професійних рішень може бути значною, а можливості кастомізації – обмеженими. Для порівняння, споживчі дрони, такі як умовний «DJI Flip» (Рис. 1.6), хоч і мають хороші камери для свого класу, значно поступаються професійним рішенням за функціоналом та надійністю для специфічних інспекційних завдань. Порівняльні характеристики цих моделей наведено у табл. 1.1.



Рис. 1.3 – Професійний інспекційний дрон DJI Matrice 30



Рис. 1.4 – Інспекційний дрон Skydio X10D з акцентом на автономність



Рис. 1.5 – Інспекційний дрон Flyability ELIOS 3 для замкнених просторів



Рис. 1.6 – Споживчий дрон DJI Flip

Табл. 1.1 – Характеристики комерційних інспекційних дронів та споживчої моделі

Характеристика	DJI Matrice 30 Series	Skydio X10D	Flyability ELIOS 3	DJI Flip (споживчий)
Призначення	Професійна інспекція, безпека	Професійна інспекція, автономна навігація	Інспекція замкнених просторів	Аматорська зйомка, подорожі
Вага (з батареєю)	~3770 г	~2110-2140 г	~1900 г (база), ~2350 г (з лідаром)	< 249 г
Макс. час польоту	~41 хв	~40 хв	>9 хв (з лідаром), >12.5 хв (база)	~31 хв
Ступінь захисту	IP55	IP55	IP44 (база), IP68 (лідар)	Відсутній
Основна камера (роздільна здатність)	12MP (широка), 48MP (зум)	50.3MP (широка), 48MP (теле), 64MP (вузька)	12.3MP (4K відео)	48MP (фото), 4K відео

Продовження табл. 1.1 – Характеристики комерційних інспекційних дронів та споживчої моделі

Тепловізор	€ (640x512 або 1280x1024)	€ (FLIR Boson+, 640x512)	€ (Lepton 3.5, 160x120)	Відсутній
Лідар	Лазерний далекомір	Відсутній (але є 360° візуальна навігація)	€ (Ouster OS0-32)	Відсутній
Система уникнення перешкод	Всеспрямована (візуальні + ІЧ)	Всеспрямована (6 візуальних камер)	SLAM (лідар + візуальні)	Спрощена (вниз, вперед)
Дальність передачі сигналу (FCC)	До 15 км	До 12 км	До 200 м	До 13 км
Орієнтовна вартість	\$8,600 - \$12,500+	\$33,900 - \$44,200+	\$50,000 - \$100,000+	\$439-\$779

Дослідницькі проекти та кастомні рішення на відкритих платформах надають значно більшу гнучкість у виборі компонентів, конфігурації та функціоналу. Це дозволяє створювати спеціалізовані рішення, максимально адаптовані під конкретні інспекційні завдання та бюджетні обмеження. Прикладом дослідницького підходу є проект NTNU «Drone Design and Construction for Indoor Inspection Scenarios» [10], де було розроблено прототип дрона для інспекції внутрішніх приміщень з унікальними конструктивними особливостями, такими як перевернуті передні мотори та дворівнева компоновка (Рис. 1.7).



Рис. 1.7 – Інспекційний дрон для внутрішніх приміщень з дослідження NTNU [10]

Основою для таких кастомних збірок часто слугують відкриті апаратні платформи польотних контролерів та відкрите програмне забезпечення (прошивки). Серед апаратних платформ популярністю користуються польотні контролери сімейства Pixhawk, які підтримують потужні прошивки, такі як ArduPilot та PX4 Autopilot, та мають широкий набір портів для підключення різноманітних сенсорів. Також поширені більш компактні та доступні польотні контролери на базі процесорів STM32F4, STM32F7, STM32H7, такі як ті, що використовуються у стеках SpeedyBee, які часто оптимізовані для роботи з прошивками Betaflight та INAV.

Ключові відкриті програмні платформи (прошивки) для польотних контролерів включають:

- Betaflight – дуже популярна прошивка, особливо для FPV-дронів, орієнтованих на швидкісні польоти та фрістайл. Вона відома своєю високою частотою оновлення циклу PID, широкими можливостями налаштування фільтрів та відгуку на керування. Для інспекційних завдань Betaflight може бути корисним завдяки своїй гнучкості та можливості точного ручного керування, особливо для маневрених дронів, призначених для огляду важкодоступних місць. Прикладом дрона, що використовує Betaflight та може бути адаптований для інспекції, є GEPRC Vapor-D6 Analog FPV Drone (Рис. 1.8), який має конструкцію, що запобігає потраплянню пропелерів у кадр.



Рис. 1.8 – FPV-дрон GEPRC Vapor-D6 на прошивці Betaflight

– INAV (Navigation Rewrite) – ця прошивка розвинулася з Cleanflight (попередника Betaflight) і має сильний акцент на навігаційні можливості, такі як політ за GPS-точками, утримання позиції, автоматичне повернення додому та планування місій. INAV добре підходить для створення інспекційних дронів, що потребують виконання автоматизованих польотів на відкритій місцевості для огляду протяжних об’єктів або картографування.

– ArduPilot (APM:Copter, APM:Plane тощо) – одна з найстаріших, найпотужніших та найбільш функціональних відкритих платформ для керування різними типами БПЛА. ArduPilot підтримує величезну кількість сенсорів, периферійних пристроїв та має складні алгоритми навігації, планування місій та уникнення перешкод. Часто використовується для створення професійних та дослідницьких БПЛА, що вимагають високої надійності та розширеного функціоналу.

– PX4 Autopilot – сучасна, потужна та модульна відкрита програмна платформа, що розробляється під егідою Dronecode Foundation. PX4 орієнтована на професійне та комерційне використання, підтримує широкий спектр апаратних платформ (включаючи Pixhawk) та має гнучку архітектуру для інтеграції нових функцій та сенсорів. Вона також відома своїми можливостями симуляції та інтеграції з ROS (Robot Operating System). Прикладом комерційного дрона, що може використовувати PX4 або подібну відкриту архітектуру, є Amovlab F410 Drone, який позиціонується як платформа для розробки та підтримує PX4, ArduPilot та FMT. Також, складні інспекційні дрони, як Flybotix ASIO X, часто базуються на принципах відкритих систем або використовують їхні компоненти для реалізації своїх унікальних можливостей.

Перевагами використання відкритих платформ є гнучкість, можливість кастомізації, нижча вартість компонентів та доступ до великої спільноти розробників. Однак, це вимагає значних технічних знань та часових затрат на збірку, налаштування та тестування. Порівняльні характеристики деяких рішень на відкритих платформах та дослідницьких прототипів наведено у табл. 1.2.

Табл. 1.2 – Порівняльний аналіз існуючих рішень інспекційних повітряних робіт за ключовими параметрами

Характеристика	Skydio X10D	Дослідницький прототип (NTNU) [10]	Flybotix ASIO X	GEPRC Vapor-D6 (Analog FPV)	«DJI Flip» (споживчий)
Тип платформи	Комерційна, професійна	Дослідницька, відкрита	Комерційна, спеціалізована	Відкрита (Betaflight)	Комерційна, споживча
Основне призначення	Автономна інспекція, безпека	Інспекція внутрішніх приміщень	Інспекція замкнених просторів	FPV-польоти, потенційна інспекція	Аматорська зйомка
Вага (з батареєю)	~2110-2140 г	~2000-2500 г (цільова) / ~1000-1600 г (міні-версія)	~1150 г	~460 г (без батареї та приймача)	< 249 г
Макс. час польоту	~40 хв	Залежить від навантаження та конфігурації (не вказано точно)	До 20 хв	~13-17 хв (з 6S 1550-2200mAh)	~31 хв
Ступінь захисту	IP55	Не вказано (прототип)	IP42 (база)*	Відсутній	Не вказано (зазвичай відсутній)
Основна камера (тип/роздільна здатність)	Цифрова / до 64MP, 4K відео	Залежить від вибору (FPV-камера для прототипу)	Цифрова / 12.3MP (4K відео)	Аналогова / Caddx H1 (1500TVL)	Цифрова / 48MP (фото), 4K відео

Продовження табл. 1.2 – Порівняльний аналіз існуючих рішень інспекційних повітряних роботів за ключовими параметрами

Тепловізор	Є (FLIR Boson+)	Не передбачено у базовому прототипі	Є (FLIR Lepton 3.5)	Відсутній	Відсутній
Лідар/Радар	Відсутній (360° візуальна навігація)	Розглядалася можливість інтеграції радарів	Є (3D ToF Lidar, Радар)	Відсутній	Відсутній
Система уникнення перешкод	Всеспрямована (6 візуальних камер)	Розглядалася (радари)	SLAM (лідар + візуальні + ToF)	Відсутня (типово для FPV)	Спрощена (вниз, вперед)
Програмне забезпечення (керування)	Пропрієтарне Skydio	Відкрите (не вказано)	Пропрієтарне Flybotix (на базі PX4)	Відкрите (Betaflight)	Пропрієтарне DJI Fly App
Орієнтовна вартість	\$33,900 - \$44,200+	Вартість компонентів (не вказано)	\$50,000 - \$100,000+	\$230,99 – \$277,99	\$439-\$779
Гнучкість/Кастомізація	Обмежена	Висока	Обмежена	Дуже висока	Низька
*Захист IP42 для базової платформи Flybotix ASIO X, сам LIDAR payload може мати вищий ступінь захисту.					

Аналіз показує, що вибір типу дрона та програмної платформи залежить від специфіки інспекційних завдань, бюджету, необхідного рівня інтеграції, автономності та наявних у розробника технічних компетенцій. Кожен підхід має свої сильні сторони та може бути оптимальним для певного кола застосувань.

1.5 Постановка задачі розробки інспекційного повітряного робота

Проведений у попередніх пунктах комплексний аналіз предметної області повітряних роботів, їхніх типів, методів керування, навігації, існуючих комерційних та відкритих рішень, а також специфічних вимог до інспекційних

БПЛА, дозволяє чітко сформулювати мету та завдання кваліфікаційної роботи. Враховуючи виявлені переваги кастомних рішень на відкритих платформах, зокрема їхню гнучкість, можливість точного налаштування під конкретні потреби та потенційно нижчу вартість порівняно з готовими професійними системами, було прийнято рішення про розробку та створення інспекційного повітряного робота саме за таким підходом.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка, конструювання, програмне налаштування та первинні випробування інспекційного повітряного робота типу квадрокоптер, призначеного для виконання завдань візуального огляду об'єктів інфраструктури з близької відстані в режимі керування від першої особи (FPV). Основний акцент робиться на створенні надійної, маневреної та функціональної платформи, здатної забезпечити оператора якісною візуальною інформацією для виявлення потенційних дефектів та оцінки стану інспектованих об'єктів.

Для досягнення поставленої мети, до розроблюваної системи висуваються наступні основні технічні та функціональні вимоги:

- надійність конструкції та компонентів – забезпечення високої механічної міцності рами та надійного кріплення всіх елементів для експлуатації в умовах, наближених до реальних. Використання якісних електронних компонентів та забезпечення їх належного захисту та охолодження.

- висока маневреність та керованість – дрон повинен демонструвати швидку та точну реакцію на команди керування, мати можливість виконувати плавні та контрольовані маневри у всіх площинах, що є критичним для FPV-пілотування поблизу перешкод та складних конструкцій.

- забезпечення якісного візуального контролю – інтеграція аналогової FPV-системи, що включає камеру з високою роздільною здатністю (не менше 1500TVL), хорошими показниками світлочутливості та широким динамічним діапазоном, а також відеопередавач з достатньою потужністю та стабільністю сигналу для передачі чіткого зображення з мінімальною затримкою.

- достатній час польоту – забезпечення автономності на рівні не менше 15-20 хвилин на одному заряді акумулятора при типовому інспекційному

навантаженні та стилі польоту, що дозволить ефективно виконувати огляд значних ділянок об'єктів.

- модульність конструкції та можливість розширення функціоналу – конструкція рами та розміщення компонентів повинні передбачати можливість легкої заміни окремих елементів у разі потреби, а також потенційне встановлення додаткового обладнання (наприклад, компактних сенсорів, освітлювальних приладів) у майбутньому без кардинальної перебудови системи.

- наявність GPS-навігації для функцій безпеки та позиціонування – інтеграція GPS-модуля для реалізації таких важливих функцій, як автоматичне повернення до точки старту (RTH) у випадку втрати зв'язку або низького заряду акумулятора, а також для можливості утримання позиції та геоприв'язки зібраних даних.

- оптимальне співвідношення ваги та міцності – прагнення до мінімізації загальної злітної маси дрона при збереженні необхідної міцності конструкції для покращення льотних характеристик та часу польоту.

- використання відкритого програмного забезпечення – застосування прошивки Betaflight для польотного контролера, що надає широкі можливості для налаштування, тюнінгу та адаптації під конкретні потреби.

- зручність експлуатації та обслуговування – забезпечення відносно простого доступу до основних компонентів для їх налаштування, діагностики та можливого ремонту.

Очікується, що успішна реалізація поставленої задачі дозволить створити функціональний прототип інспекційного FPV-дрона, здатного виконувати завдання візуального огляду для виявлення дефектів та оцінки стану різних типів об'єктів інфраструктури, таких як: виявлення тріщин та деформацій на поверхнях будівель та інженерних споруд (мости, опори), оцінка стану поверхні та виявлення ознак деградації чи корозії, інспекція ліній електропередач на предмет пошкодження ізоляторів або проводів, а також огляд інших важкодоступних елементів конструкцій. Створений апарат продемонструє

потенціал використання кастомних рішень на відкритих компонентах для вирішення практичних завдань візуальної інспекції.

1.6 Висновок за розділом 1

Проведений у даному розділі аналіз предметної області дозволив сформулювати комплексне уявлення про сучасний стан, тенденції розвитку та ключові аспекти застосування повітряних роботів, зокрема, у сфері інспекції об'єктів інфраструктури. Було встановлено, що БПЛА, еволюціонувавши від військових технологій, стали незамінними багатоцільовими платформами у численних цивільних та комерційних галузях, пропонуючи значні переваги в ефективності, безпеці та вартості виконання завдань.

Розгляд класифікації повітряних роботів виявив різноманіття конструктивних рішень, серед яких мультироторні системи, завдяки своїй здатності до вертикального зльоту/посадки та маневреності, є найбільш поширеними для інспекційних завдань, що вимагають близького огляду. Водночас, апарати літакового типу та гібридні БПЛА мають свої переваги для специфічних сценаріїв, таких як моніторинг протяжних об'єктів або виконання місій, що вимагають значної автономності. Сфери застосування дронів охоплюють широкий спектр від сільського господарства та картографії до медіа та будівництва, проте саме інспекційні завдання демонструють один з найвищих потенціалів для подальшого розвитку та впровадження цих технологій.

Аналіз методів керування та навігації показав важливість як ручних підходів, зокрема FPV-пілотування для точного маневрування, так і автоматизованих режимів на основі GPS-навігації (утримання позиції, політ за точками, автоматичне повернення) для підвищення ефективності та безпеки польотів. Окрему увагу було приділено системам уникнення перешкод, які використовують різноманітні сенсорні технології (ультразвук, ІЧ, оптика, лідари, ToF) і є критично важливими для безпечної роботи дронів поблизу інспектованих об'єктів.

Було детально розглянуто специфічні вимоги, що висуваються до інспекційних дронів при огляді інфраструктури. До них належать висока стабільність польоту та точність позиціонування для отримання якісних даних, можливість безпечного маневрування на близьких відстанях до об'єктів, а також наявність якісної системи візуалізації, що включає FPV-камеру з високою роздільною здатністю, широким динамічним діапазоном, низькою затримкою та надійний відеоканал. Також важливими є достатній час польоту, маневреність, міцність конструкції та потенціал для встановлення додаткових сенсорів.

Огляд існуючих рішень на ринку інспекційних БПЛА виявив наявність як високотехнологічних та дорогих комерційних платформ від провідних виробників, що пропонують інтегровані рішення «під ключ», так і значний потенціал кастомних систем, зібраних на базі відкритих апаратних компонентів та програмного забезпечення (наприклад, польотні контролери типу Pixhawk або SpeedyBee з прошивками Betaflight, INAV, ArduPilot, PX4). Дослідницькі проєкти також роблять вагомий внесок, пропонуючи інноваційні підходи та конструктивні рішення. Порівняльний аналіз показав, що вибір оптимального рішення залежить від конкретних завдань, бюджету та необхідного рівня гнучкості та автономності.

На основі всебічного аналізу було сформульовано мету і задачі даної кваліфікаційної роботи. Метою роботи визначено розробку, конструювання, програмне налаштування та первинні випробування інспекційного повітряного робота типу квадрокоптер на базі відкритих компонентів та FPV-технологій. Сформульовано ключові технічні та функціональні вимоги до розроблюваної системи, що включають надійність, маневреність, якість візуального контролю, достатній час польоту, модульність та наявність GPS-навігації. Окреслено основні етапи реалізації проєкту та очікувані можливості застосування створеного дрона для візуальної інспекції об'єктів інфраструктури.

Таким чином, проведений аналіз дозволив глибоко вивчити поточний стан та тенденції розвитку інспекційних повітряних роботів, виявити ключові технології та підходи, а також обґрунтувати актуальність та чітко визначити

напрямок власної розробки, що буде детально представлена у наступних розділах даної кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМ РОБОТОМ

2.1 Аналіз вимог до апаратних компонентів інспекційного дрона

На основі аналізу предметної області та поставленої задачі розробки, було сформовано ключові вимоги до апаратних компонентів інспекційного дрона. Ці вимоги стосувалися автономності та часу польоту (цільовий показник 15-20 хвилин), дальності та якості зв'язку (не менше 1-2 км для керування та відео в умовах прямої видимості, мінімальна затримка аналогового відеосигналу до 20-30 мс), характеристик FPV-камери (не менше 1200-1500 TVL, висока світлочутливість, WDR), стабільності польоту та стійкості до вітру (до 8-10 м/с), можливості встановлення GPS-модуля для навігації та функцій безпеки, а також маневреності та потенційної вантажопідйомності (до 200-300 г додаткового навантаження).

2.2 Вибір апаратних компонентів дрона

Після детального формування технічних вимог до інспекційного повітряного робота, було проведено ретельний вибір кожного ключового апаратного компонента, що входить до складу дрона.

2.2.1 Рама

Для забезпечення міцності, жорсткості та можливості встановлення 7-дюймових пропелерів було обрано карбонову раму Mark4 V2 7Inch 295mm Carbon Fiber Frame X-подібної структури.

Ключові технічні характеристики обраної рами наведено в табл. 2.1.

Табл. 2.1 – Технічні характеристики рами Mark4 V2 7Inch 295mm

Параметр	Значення
Структура рами	X-Type
Відстань між центрами двигунів	295 мм
Розмір (габаритний)	193.75 мм * 223.06 мм
Товщина нижньої пластини	3.0 мм
Товщина середньої пластини	3.0 мм
Товщина верхньої пластини	2.0 мм
Товщина променів	6.0 мм
Товщина бічної пластини камери	2.5 мм
Відстань між отворами для встановлення VTX	20 на 20 мм і 30.5 на 30.5 мм
Відстань між отворами для встановлення польотного контролера	20 на 20 мм і 30.5 на 30.5 мм
Висота внутрішнього простору	35 мм
Позиції отворів для встановлення моторів	16 на 16 мм і 19 на 19 мм
Матеріал	Карбонове волокно

Вибір обґрунтований оптимальним розміром для 7-дюймових пропелерів, високою міцністю карбонової конструкції, достатнім внутрішнім простором для монтажу електроніки та стандартними кріпленнями.

2.2.2 Стек

Польотний стек, що об'єднує польотний контролер (FC) та регулятори обертів двигунів (ESC), є «мозковим центром» та «силовою установкою» повітряного робота. Від правильного вибору цих компонентів залежить стабільність польоту, точність виконання команд, надійність роботи рушійної системи та можливість підключення всієї необхідної периферії. Для інспекційного дрона важливо обрати стек, що забезпечує достатню обчислювальну потужність, надійні сенсори, підтримку сучасних протоколів керування та має достатній запас по струму для обраних моторів та акумулятора.

Проаналізувавши ринок та враховуючи вимоги до підтримки прошивки Betaflight, можливості підключення GPS, FPV-системи, приймача ELRS, а також необхідність живлення 6S LiPo акумулятором, для розроблюваного

інспекційного дрона було обрано стек SpeedyBee F405 V3 BLS 60A 30x30 FC&ESC Stack.

Польотний контролер SpeedyBee F405 V3 відповідає за обробку даних з сенсорів, виконання алгоритмів стабілізації та керування, а також взаємодію з усіма периферійними пристроями.

Ключові технічні характеристики польотного контролера наведено в табл. 2.2.

Табл. 2.2 – Технічні характеристики польотного контролера SpeedyBee F405 V3

Параметр	Значення
Мікроконтролер (MCU)	STM32F405
Інерційний вимірювальний блок (IMU/Gyro)	BMI270
Барометр	Вбудований
OSD Чіп	AT7456E
Bluetooth	Підтримується (для налаштування через додаток SpeedyBee)
Підключення DJI Air Unit	6-контактний роз'єм або пайка
Слот для MicroSD карти (Blackbox)	Підтримується (SDSC/SDHC, FAT16/FAT32, до 32GB, розпізнає до 4GB)
Вхід датчика струму	Підтримується
Вхідне живлення	3S - 6S LiPo
Вихід 5V	9 груп, загальне навантаження 2A
Вихід 9V	2 групи, загальне навантаження 2A
Вихід 4.5V	Підтримується, до 1A (для приймача та GPS при живленні від USB)
Кількість UART портів	6 (UART4 для Bluetooth, UART5 для телеметрії ESC)
I2C	Підтримується (для магнітометра, сонара тощо)
Підтримувані прошивки	BetaFlight (за замовчуванням), INAV (DSHOT не підтримується в INAV)
Цільове ім'я прошивки (Target Name)	SPEEDYBEEF405V3
Монтажні отвори	30,5 на 30,5 мм (діаметр отвору 4 мм)
Розміри	41.6(Д) x 39.4(Ш) x 7.8(В) мм
Вага	9.6 г

Регулятор обертів двигунів SpeedyBee BLS 60A 4-in-1 відповідає за керування швидкістю обертання кожного з чотирьох безколекторних моторів,

отримуючи команди від польотного контролера.

Ключові технічні характеристики ESC наведено в табл. 2.3.

Табл. 2.3 – Технічні характеристики ESC SpeedyBee BLS 60A 4-in-1

Параметр	Значення
Прошивка	BLHeli_S J-H-40
Постійний струм	60A * 4
Піковий струм	80A (10 секунд)
TVS захисний діод	Є
Зовнішній конденсатор	1000uF Low ESR (в комплекті)
Протокол ESC	DSHOT300/600
Вхідне живлення	3-6S LiPo
Вихідне живлення	VBAT
Датчик струму	Підтримується (Scale=400 Offset=0 для FC SpeedyBee)
Телеметрія ESC	Не підтримується
Монтажні отвори	30.5 на 30.5 мм (діаметр отвору 4 мм)
Розміри	45.6(Д) * 44(Ш) * 8мм(В)
Вага	23.5 г

Вибір зумовлений продуктивністю FC (STM32F405, BMI270), наявністю необхідних портів, підтримкою Bluetooth для налаштування, запасом по струму ESC (60A/80A), підтримкою DSHOT та інтегрованим рішенням, що спрощує збірку.

2.2.3 Мотори

Для 7-дюймових пропелерів та 6S LiPo акумулятора обрано комплект безколекторних моторів EMAX ECOII 2807 3-6S 1300KV.

Ключові технічні характеристики обраних моторів наведено в табл. 2.4.

Табл. 2.4 – Технічні характеристики моторів EMAX ECOII 2807 6S 1300KV

Параметр	Значення
Модель	EMAX ECOII 2807
KV-рейтинг	1300 об/В
Розміри мотора	ø 33.9 мм * 34 мм
Конфігурація (Framework)	12N14P (12 пазів статора, 14 полюсів ротора)
Діаметр валу підшипника	4 мм
Провід живлення	18#AWG, довжина 200 мм

Продовження табл. 2.4 – Технічні характеристики моторів EMAX ECOII 2807 6S 1300KV

Вага (без силових проводів)	47.6 г
Струм холостого ходу (10V)	1.3 A
Внутрішній опір	58 мОм
Кількість комірок LiPo (No. of cells)	3-6S
Рекомендований пропелер	6"-7"
Піковий струм (на 6S)	52 A
Максимальна потужність (на 6S)	1310 Вт

Обґрунтуванням є оптимальне поєднання розміру статора та KV для 7-дюймових пропелерів на 6S, що забезпечує баланс тяги, ефективності та динаміки; достатня потужність та надійність від відомого виробника.

2.2.4 Пропелери

Обрано трилопатеві пропелери HQProp DP7X3.5X3GR-PC (7035), відомі своєю якістю та ефективністю.

Ключові технічні характеристики обраних пропелерів наведено в табл. 2.5.

Табл. 2.5 – Технічні характеристики пропелерів HQProp 7X3.5X3GR-PC

Параметр	Значення
Виробник	HQProp
Модель	DP7X3.5X3GR-PC
Матеріал	Полікарбонат (PC)
Діаметр гвинта	7 дюймів (7")
Крок гвинта	3.5 дюйма (3.5")
Кількість лопатей	3
Вага одного пропелера	8.8 г
Діаметр ступиці	13.5 мм
Товщина ступиці	7 мм
Діаметр центрального отвору	5 мм

Вибір зумовлений оптимальним розміром (7 дюймів) та кроком (3.5 дюйма) для обраних моторів, трилопатевою конструкцією для плавності та стабільності, а також міцним полікарбонатним матеріалом.

2.2.5 Камера

Для аналогової FPV-системи обрано камеру Foxeer T-Rex Micro з високою роздільною здатністю та низькою затримкою.

Ключові технічні характеристики обраної FPV-камери наведено в табл. 2.6.

Табл. 2.6 – Технічні характеристики FPV-камери Foxeer T-Rex Micro

Параметр	Значення
Модель	Foxeer T-Rex Micro
Матриця	CMOS 2MP
Горизонтальна роздільна здатність	1500TVL
Масштаб зображення (перемикається)	4:3 / 16:9
ТВ система (перемикається)	NTSC / PAL
Затримка	до 2 мс
Лінза	1.7 мм
Кут огляду (FOV)	4:3 FOV-H 120° FOV-D 150° 16:9 FOV-H 155° FOV-D 175°
Динамічний діапазон (WDR)	Super WDR (110 дБ)
Мінімальна освітленість	0.001 Lux
Вхідна напруга	4.5 В ~ 16 В
Споживання електроенергії	115мА при DC12V, 270мА при DC5V
Розмір	19 x 19 мм
Вага (без тримача)	8.6 г
Додаткові функції	Переворот зображення, підтримка OSD, дистанційне керування меню через Foxeer FC

Обґрунтуванням є висока роздільна здатність (1500TVL), наднизька затримка (до 2 мс), хороша робота в умовах низької освітленості, широкий динамічний діапазон (WDR 110 дБ) та компактний розмір.

2.2.6 Передавач відео

Обрано відеопередавач GEPRC MATEN 5.8G 2.5W VTX PRO з високою максимальною потужністю та надійним

Ключові технічні характеристики обраного відеопередавача наведено в табл. 2.7.

Табл. 2.7 – Технічні характеристики відеопередавача GEPRC MATEN 5.8G 2.5W VTX PRO

Параметр	Значення
Модель	GEPRC MATEN 5.8G 2.5W VTX PRO
Розмір	36.3 × 36.3 × 15.1 мм
Монтажні отвори	20x20 мм (M2), 30.5 × 30.5 мм (M2)
Вихідна потужність (регульована)	25мВт/200мВт/600мВт/1600мВт/2500мВт/Pit mode
Частота	5.8 ГГц
Кількість каналів	72CH
Вхідна напруга	DC 7-36В (2-8S Акумулятор)
Вихідна напруга (для камери)	5В @ 600мА
Протокол керування	IRC Tramp
Інтерфейс антени	MMCX
Інтерфейс кабелю	SH1.0 6pin
Формат відео	PAL/NTSC
Мікрофон	Вбудований
Вага	20 г

Вибір обґрунтований високою та регульованою вихідною потужністю (до 2500 мВт) для значної дальності, ефективним охолодженням, підтримкою протоколу IRC Tramp та широким діапазоном вхідної напруги.

2.2.7 Акумулятор

Обрано літій-полімерний (LiPo) акумулятор CNHL G+Plus 4000mAh 22.2V 6S 70C Lipo XT60.

Ключові технічні характеристики обраного акумулятора наведено в табл. 2.8.

Табл. 2.8 – Технічні характеристики акумулятора CNHL G+Plus 4000mAh 22.2V 6S 70C

Параметр	Значення
Бренд	CNHL
Серія	G+Plus
Ємність	4000 мАг
Кількість елементів (конфігурація)	6S (6 елементів послідовно)
Номінальна струмовіддача	70C
Максимальна струмовіддача	140C

Продовження табл. 2.8 – Технічні характеристики акумулятора CNHL G+Plus 4000mAh 22.2V 6S 70C

Номинальна напруга	22.2 V
Силовий конектор	XT60 (або XT90)
Тип силового кабелю	12AWG (або 10AWG)
Балансувальний роз'єм	JST/XH
Розміри	43 x 46 x 156 мм
Вага (з XT60)	622 г

Вибір зумовлений оптимальною ємністю (4000 мАг) для цільового часу польоту, високою напругою (6S) для ефективності моторів та високою струмовіддачею (70C).

2.2.8 FPV Антена

Обрано антену з круговою поляризацією Original Foxeer Lollipop 4 V4 High Gain Antenna 5.7G 2.6Dbi.

Ключові технічні характеристики обраної FPV антени (для варіанту SMA 10CM) наведено в табл. 2.9.

Табл. 2.9 – Технічні характеристики FPV антени Foxeer Lollipop 4 V4 High Gain Antenna (SMA 10CM)

Параметр	Значення
Бренд	Foxeer
Модель	Lollipop 4 V4 High Gain
Центральна частота	5.7 ГГц
Коефіцієнт підсилення	2.6 dBi
Осьове відношення (Axial ratio)	Близьке до 1
Смуга пропускання	5.5 - 6 ГГц
Ефективність випромінювання	98%
КСХ (V.SWR) на центр. частоті	1.07
Роз'єм	SMA
Вага	8.8 г
Розміри	Φ11*100 мм
Довжина кабелю	91 мм
Поляризація	RHCP (Права кругова поляризація)
Матеріал корпусу	PC+ABS
Тип кабелю	RG178, SFX086

Обґрунтуванням є робота на частоті 5.8 ГГц, кругова поляризація (RHCP) для боротьби з багатопроменевим поширенням, хороший коефіцієнт підсилення (2.6 dBi) та низький KCX (V.SWR 1.07).

2.2.9 Приймач радіокерування

Вибрано приймач HappyModel ES900 DUAL RX ELRS Diversity Receiver 915MHz для забезпечення максимальної дальності та надійності зв'язку.

Ключові технічні характеристики обраного приймача радіокерування наведено в табл. 2.10.

RX Табл. 2.10 – Технічні характеристики приймача HappyModel ES900 DUAL

Параметр	Значення
Бренд	HappyModel
Модель	ES900 DUAL RX
Тип	915МГц True Diversity приймач
Мікроконтролер/Чіп	ESP32 PICO D4, dual SX1276
Роз'єм антени	IPEX MHF 1/U.FL
Робоча частота	915 МГц
Потужність телеметрії	17 dBm
Протокол приймача	CRSF (Crossfire Serial Protocol - для ExpressLRS)
Вхідна напруга	+5В DC (на контакті «5v»)
Розмір плати	21.5 мм x 16 мм
Вага (без антени)	1.5 г
Додаткові особливості	Вбудований TCXO (термокомпенсований кварцовий генератор)
Цільова прошивка	HappyModel ES900 Dual RX

Вибір зумовлений протоколом ExpressLRS (ELRS), робочою частотою 915 МГц для кращої проникності, технологією True Diversity та наявністю TCXO.

2.2.10 Бузер

Обрано активний бузер iFlight YR50B_S для полегшення пошуку дрона.

Ключові технічні характеристики обраного бузера наведено в табл. 2.11.

Табл. 2.11 – Технічні характеристики бузера iFlight YR50B_S

Параметр	Значення
Бренд	iFlight
Модель	YR50B_S Finder Buzzer
Розмір	18 * 17 * 15 мм
Вага	4 г
Гучність	До 100 дБ
Живлення	Від польотного контролера
Додаткові функції	Подвійні миготливі світлодіоди, кнопка деактивації
Сумісність	З польотними контролерами для FPV-квадрокоптерів та приймачами для RC-літаків

Обґрунтуванням є висока гучність (до 100 дБ), світлодіодна індикація, вбудований акумулятор та простота підключення до польотного контролера.

2.2.11 GPS-модуль

Обрано GNSS-модуль Beitian GPS Module BE-220 with Antenna M10050 для навігаційних функцій та безпеки.

Ключові технічні характеристики обраного GNSS-модуля наведено в табл. 2.12.

Табл. 2.12 – Технічні характеристики GPS-модуля Beitian BE-220

Параметр	Значення
Бренд	Beitian
Модель	BE-220
Чіп	M10050
Підтримувані частоти/системи	GPS L1 C/A, QZSS L1 C/A/S, BDS B1I/B1C, Galileo E1B/C, SBAS L1 C/A (WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN)
Режим роботи	GPS+BDS+GALILEO+SBAS+QZSS

Продовження табл. 2.12 – Технічні характеристики GPS-модуля Beitian BE-220

Чутливість	Відстеження: -166dBm; Повторний захват: -160dBm; Холодний старт: -148dBm; Гарячий старт: -160dBm
Точність позиціонування (горизонтальна)	1.5м CEP 2D RMS (з SBAS, на відкритому небі)
Точність визначення швидкості	0.05 м/с
Точність динамічного кута курсу	0.3 градуси
Час старту	Холодний: 27с; Гарячий: 1с; З підтримкою: 1с
Швидкість передачі даних	4800bps-921600bps (за замовчуванням 38400bps)
Протоколи виведення даних	NMEA, UBX
Частота оновлення	0.25Гц-18Гц (за замовчуванням 1Гц)
Напруга живлення	DC 3.6В-5.5В (типово: 5.0В)
Споживаний струм (нормальний)	50мА при 5.0В
Розміри	22 * 20 * 6 мм
Вага	5.3 г
Робоча температура	-40°C ~ +85°C
Вбудований світлодіод	TX LED (синій, блимає при передачі даних)

Вибір зумовлений підтримкою декількох GNSS систем, достатньою точністю позиціонування (1.5м CEP), швидким часом старту та компактними розмірами.

2.3 Вибір комплектуючих для наземної станції оператора

У рамках даного етапу було проведено вибір ключових компонентів, що складають наземну станцію оператора, виходячи з вимог до надійності зв'язку, якості візуалізації та зручності експлуатації.

2.3.1 Апаратура радіокерування

Обрано апаратуру Radiomaster Boxer 2.4G 16CH (версія з ELRS) у поєднанні із зовнішнім передавальним модулем RadioMaster Bandit Micro 915MHz ExpressLRS 1000mW.

Ключові технічні характеристики обраної апаратури радіокерування наведено в табл. 2.13.

Табл. 2.13 – Технічні характеристики апаратури радіокерування Radiomaster Boxer 2.4G 16CH ELRS

Параметр	Значення
Модель	BOXER Radio (версія ELRS 2.4GHz)
Розміри	235 на 178 на 77мм
Вага	532.5 г
Частота внутрішнього RF модуля	2.400ГГц-2.480ГГц (ExpressLRS)
Підтримувані протоколи	Залежить від модуля (внутрішній ELRS)
Діапазон напруги живлення	6.6-8.4В DC
Прошивка	EdgeTX (передавач) / ELRS (RF модуль)
Кількість каналів	Максимум 16 (залежить від приймача)
Акумулятор	7.4В 2-елементний Li-Po / Два 3.7В 18650 Li-Ion (не входять в комплект)
Дисплей	128*64 Монохромний LCD
Стіки (Gimbal)	Високоточні Hall V4.0
Зовнішній модуль	Сумісний з JR/FrSKY/Crossfire
Оновлення прошивки	USB/SD карта & EdgeTX Companion PC software

Ключові технічні характеристики обраного зовнішнього передавального модуля наведено в табл. 2.14.

Табл. 2.14 – Технічні характеристики модуля передавача RadioMaster Bandit Micro 915MHz ExpressLRS

Параметр	Значення
Модель	Bandit Micro ExpressLRS RF Module
Регуляторний домен	FCC915
Мікроконтролери	ESP32 (основний), ESP8285 (допоміжний, як ESP backpack)
RF Чіп	SEMTECH SX1276
Частота оновлення	Мін/Макс: 25Гц/200Гц
Вихідна потужність	До 1 Вт (1000 мВт)
Роз'єм	Micro standard 5pin
Дисплей	Вбудований OLED
Напруга живлення (XT30)	DC 6В ~ 16.8В
Вага (з Т-антеною)	78.0 г
Розміри	64.1 на 49.6 на 34.1 мм

Продовження табл. 2.14 – Технічні характеристики модуля передавача RadioMaster Bandit Micro 915MHz ExpressLRS

Додаткові функції	Вбудований TCXO, Wifi та Bluetooth, 5-позиційна навігаційна клавіша
-------------------	---

Обґрунтуванням є підтримка протоколу ELRS, висока вихідна потужність модуля 915МГц, якісні стіки та функціональна прошивка EdgeTX.

2.3.2 Відеошолом FPV

Для розроблюваного інспекційного дрона, що використовує аналогову FPV-систему на частоті 5.8 ГГц, було обрано відеошолом Skyzone Cobra X V4 5.8G з приймачем SteadyView.

Ключові технічні характеристики обраного відеошолома наведено в табл. 2.15.

Табл. 2.15 – Технічні характеристики відеошолома Skyzone Cobra X V4

Параметр	Значення
Бренд	Skyzone
Модель	Cobra X V4
Тип екрана	LCD 4.1"
Роздільна здатність екрана	1280x720 пікселів
Кут огляду (FOV, за діагоналлю)	50°
Співвідношення сторін (перемикається)	4:3 / 16:9
Формат ТВ	NTSC/PAL (автоматичний вибір)
Приймач	RapidMix SteadyView 5.8G, 48 каналів (режими Diversity та RapidMix)
Роз'єм антен приймача	SMA jack
DVR (цифровий відеореєстратор)	Кодек H264, 60fps, MOV 6Mbps, підтримка карт Micro SD до 128Gb (клас 10)
Head Tracker	Вбудований (3-осьовий акселерометр, 3-осьовий гіроскоп)
Живлення	1 x 18650 Li-ion / DC 6.5-25.2V (2-6S LiPo) / USB 5V
Розміри	190 x 150 x 110 мм
Вага	332 г
Додаткові функції	Вбудований кулер, навігація по меню коліщатком, OSD меню (10 мов), можливість заміни приймача

Вибір зумовлений високою якістю зображення для аналогового сигналу, сучасним приймачем SteadyView з технологією RapidMix, вбудованим DVR та гнучкістю живлення.

2.3.3 Зарядний пристрій

Обрано мультифункціональний зарядний пристрій SkyRC S100 Neo LiPo 1-6s 200W AC/DC.

Ключові технічні характеристики обраного зарядного пристрою наведено в табл. 2.16.

Табл. 2.16 – Технічні характеристики зарядного пристрою SkyRC S100 Neo

Параметр	Значення
Бренд	SKYRC
Модель	S100 Neo
Тип дисплея	TN, 1.77 дюйма, 128x160 пікселів, 262K кольорів
Вхідна напруга	DC: 6-30 В; AC: 100-240 В 50/60 Гц
Потужність зарядного пристрою	DC: макс. 200 Вт; AC: макс. 100 Вт
Потужність розряду	Основний порт: 5 Вт; Головний порт + Балансовий порт: Макс. 20 Вт (на основі 6S)
Типи підтримуваних батарей/елементів	LiPo/LiHV/LiFe/LiIon: 1-6s; NiMH/NiCd: 1-15s; Pb: 3S/6S/12S
Струм заряду	0.1-12.0 А
Струм розряду	0.1-2.0 А
Балансовий струм (для LiPo/LiHV/LiFe/LiIon)	Макс. 1000 мА
Режими роботи для LiPo/LiHV/LiFe/LiIon	Збалансоване заряджання, заряджання, розряджання, зберігання
Функція цифрового блоку живлення DC	Напруга: 2-30 В; Струм: 0.1-12 А (залежно від напруги); Потужність: AC Макс. 100 Вт, DC Макс. 100 Вт
Матеріал корпусу	Полікарбонат/ABS пластик
Розміри	105 на 105 на 62 мм
Вага	340 г

Обґрунтуванням є універсальність живлення (AC/DC), достатня потужність заряджання, підтримка LiPo 6S та наявність важливих режимів (балансування, зберігання) та функцій безпеки.

2.4 Розробка функціональної та принципової схем системи

Для візуалізації взаємозв'язків між обраними компонентами було розроблено функціональну та принципові схеми.

2.4.1 Функціональна схема наземної станції та бортової системи

Розроблена схема (Рис. 2.16) ілюструє основні функціональні блоки наземної станції та бортової системи, а також потоки інформації та керуючих сигналів

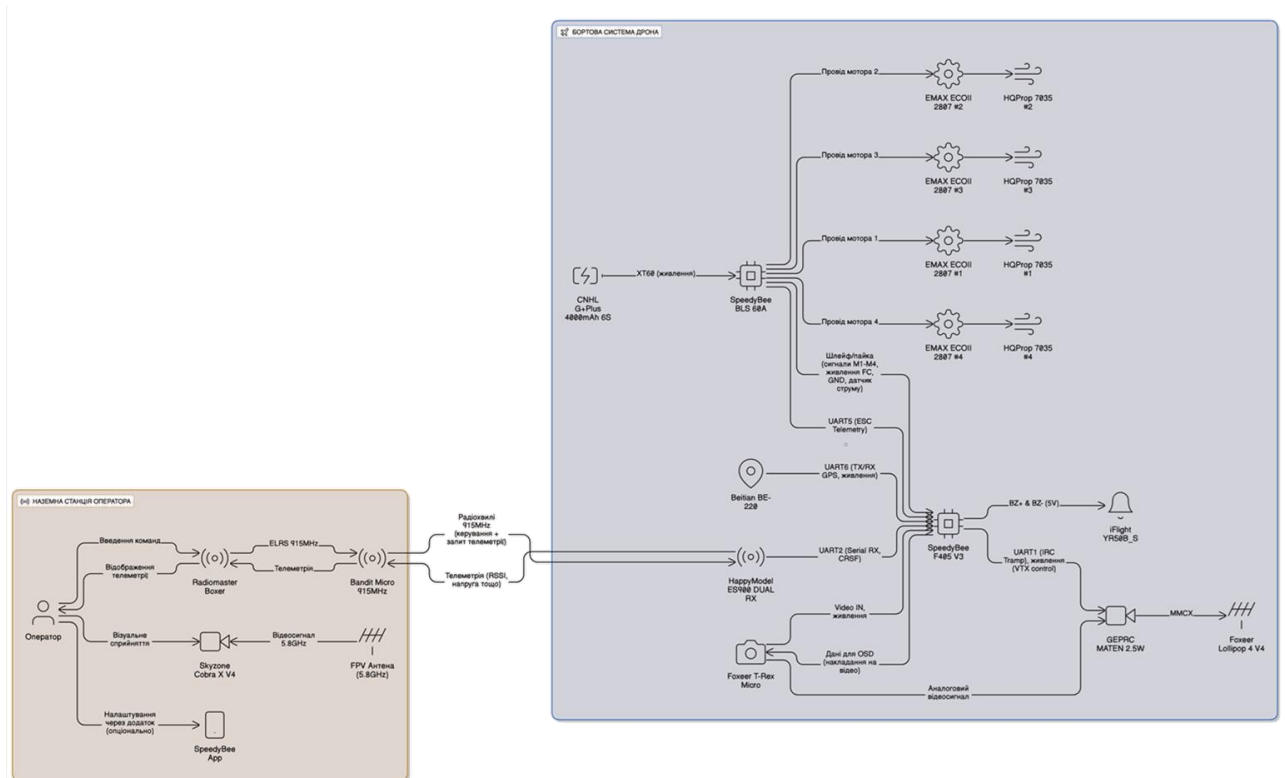


Рис. 2.16 – Загальна функціональна схема інспекційного повітряного робота

2.4.2 Принципові схеми контролера польоту та регулятора обертів

Розроблена схема (Рис. 2.17) деталізує електричні з'єднання між польотним контролером та компонентами дрона.

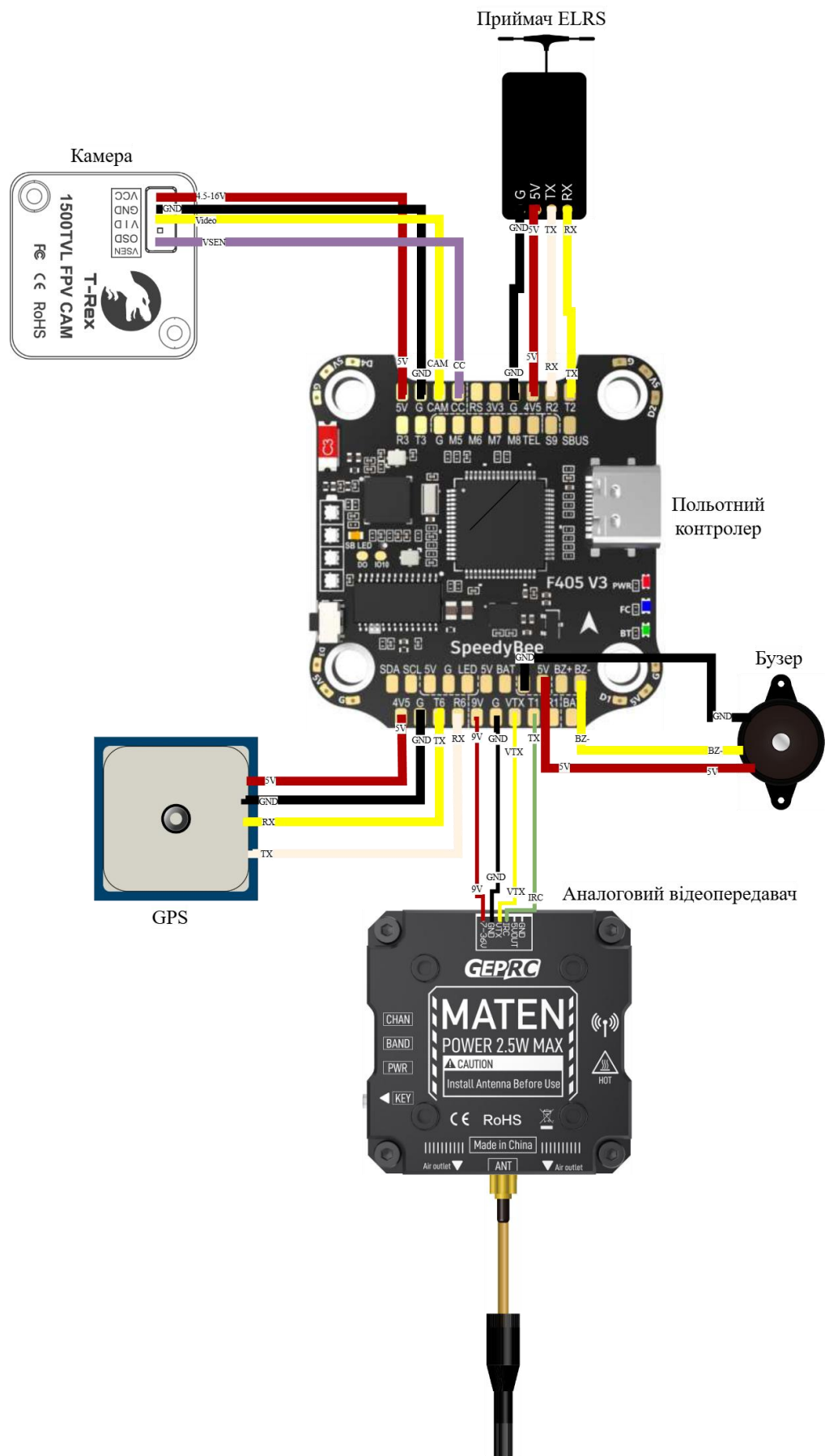


Рис. 2.17 – Принципова схема підключення основних компонентів інспекційного дрона до польотного контролера

Розроблена схема (Рис. 2.18) деталізує з'єднання між регулятором обертів та моторами.

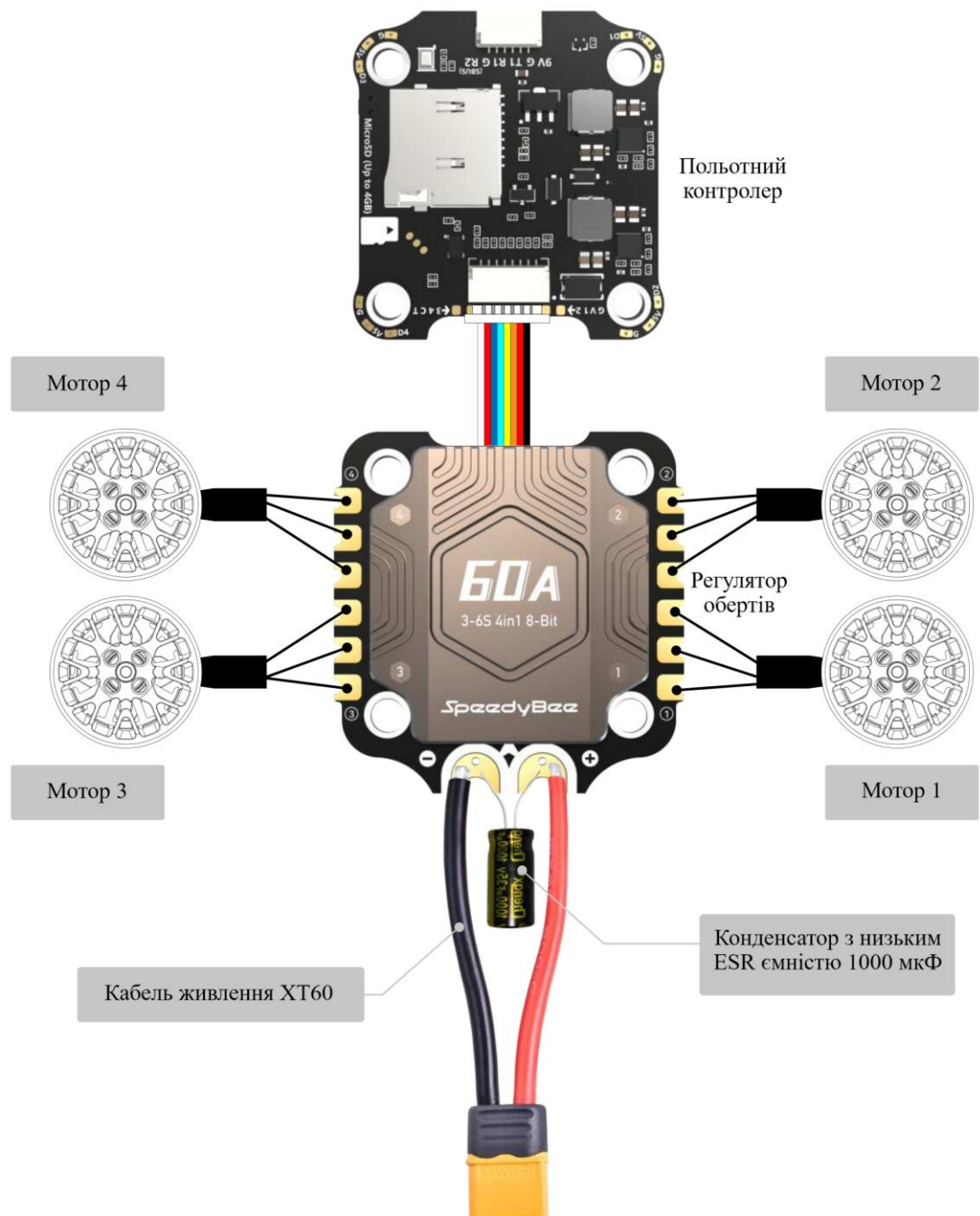


Рис. 2.18 – Принципова схема підключення основних силових компонентів інспекційного дрона

2.4.3 Схема організації каналів передачі сигналів керування та відео

Розроблена схема (Рис. 2.19) візуалізує шляхи проходження сигналів керування та відео.

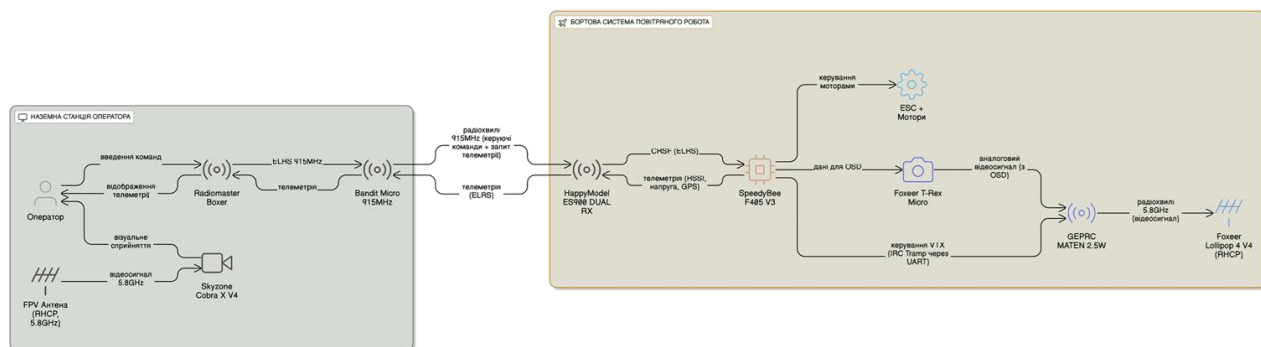


Рис. 2.19 – Схема організації каналів передачі сигналів керування та відео інспекційного дрона

2.4.4 Схема підключення додаткових модулів до польотного контролера

Розроблена схема (Рис. 2.20) показує підключення GPS-модуля та бузера до польотного контролера

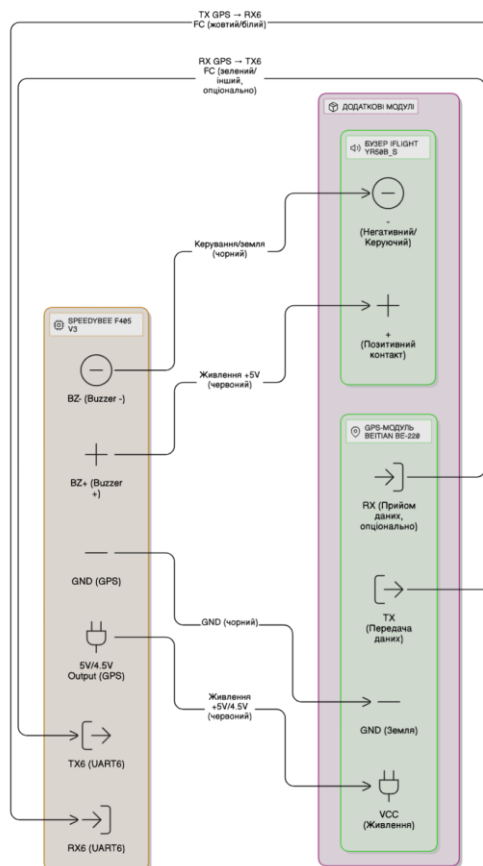


Рис. 2.20 – Схема підключення GPS-модуля та бузера до польотного контролера

2.5 Висновок за розділом 2

У даному розділі було проведено детальний процес формування вимог та обґрунтованого вибору апаратних компонентів, необхідних для створення функціонального інспекційного повітряного робота та відповідної наземної станції оператора. Робота базувалася на аналізі, проведеному в першому розділі, та поставленій задачі розробки.

Спочатку було сформульовано ключові технічні вимоги до апаратних компонентів дрона (п. 2.1), що охопили такі аспекти, як необхідна автономність та час польоту, дальність та якість зв'язку (як керування, так і відеопередачі), характеристики бортової FPV-камери, вимоги до стабільності польоту, стійкості до вібрацій та вітрових навантажень, а також можливість встановлення GPS-модуля та потенційного додаткового обладнання.

На основі цих вимог було здійснено аргументований вибір кожного основного компонента бортової системи інспекційного дрона (п. 2.2):

- вбрано карбонову раму відповідного розміру (Mark4 V2 7Inch 295mm), що забезпечує необхідну міцність, жорсткість та простір для монтажу.

- визначено інтегрований стек (SpeedyBee F405 V3 BLS 60A), що поєднує польотний контролер з достатньою продуктивністю та набором сенсорів, та регулятори обертів двигунів з необхідним запасом по струму.

- підібрано безколекторні мотори (EMAX ECOII Series eco ii 2807 1300KV) та відповідні трилопатеві пропелери (HQProp 7X3.5X3), що забезпечують оптимальне поєднання тяги та ефективності для 7-дюймової платформи на 6S живленні.

- обґрунтовано вибір аналогової FPV-камери (Foxeer T-Rex Micro) з високою роздільною здатністю для свого класу та мінімальною затримкою, а також потужного відеопередавача (GEPRC MATEN 5.8G 2.5W VTX PRO) для стабільної передачі відеосигналу.

- визначено акумуляторну батарею (CNHL G+Plus 4000mAh 6S 70C) з необхідною ємністю та струмовіддачею для досягнення цільового часу польоту.

- вибрано FPV-антену (Foxeer Lollipop 4 V4) з круговою поляризацією для покращення якості прийому відеосигналу.
- визначено приймач радіокерування (HappyModel ES900 DUAL RX ELRS 915MHz), що працює за далекобійним та надійним протоколом.
- підібрано звуковий сигналізатор (бузер iFlight YR50B_S) та GPS-модуль (Beitian BE-220) для розширення функціональності та підвищення безпеки.

Також було обґрунтовано вибір компонентів для наземної станції оператора (п. 2.3), включаючи апаратуру радіокерування (Radiomaster Boxer з модулем RadioMaster Bandit Micro 915MHz ELRS), відеошолом FPV (Skyzone Cobra X V4) та зарядний пристрій для акумуляторів (SkyRC S100 Neo), що забезпечують комфортне та ефективне керування дроном та його обслуговування.

На завершення етапу вибору компонентів було розроблено функціональну та принципові схеми системи (п. 2.4), які візуалізують загальну архітектуру повітряного робота, шляхи проходження сигналів керування та відео, а також деталізують підключення основних силових, керуючих та додаткових модулів. Ці схеми слугуватимуть основою для практичної збірки та налаштування дрона.

Таким чином, у другому розділі було сформовано повний та технічно обґрунтований перелік апаратних засобів, необхідних для реалізації поставленої задачі розробки інспекційного повітряного робота. Обрана конфігурація компонентів спрямована на досягнення оптимального балансу між продуктивністю, надійністю, функціональністю та вартістю, що створює міцну основу для переходу до етапів конструювання, програмного налаштування та випробувань, які будуть описані в наступних розділах даної кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 3

СКЛАДАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПІДКЛЮЧЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ДРОНА

3.1 Необхідні інструменти та матеріали для складання та паяння

Для реалізації проєкту було підготовлено спеціалізований набір інструментів та відповідних витратних матеріалів. Основні інструменти включали набір шестигранних викруток (1.5-3 мм), ключ для пропелерів (M5 8мм), пінцети, бокорізи та мультиметр. Для паяльних робіт використовувався паяльник з регулюванням температури, припій, флюс no-clean (Flux Plus 6-412-A), очищувач-активатор жала та губка. Серед витратних матеріалів (Рис. 3.1) були ізострічка, нейлонові стяжки, термоусадкова трубка (3 та 6 мм) та захисне обплетення для проводів (6 мм). Належна підготовка інструментів та матеріалів забезпечила якісне виконання подальших робіт.



Рис. 3.1 – Загальний набір інструментів та матеріалів для збірки та паяння дрона

3.2 Збірка конструктивних компонентів

Механічна збірка основних конструктивних компонентів включала послідовне з'єднання елементів рами та встановлення на неї моторів, що є запорукою міцності та правильної геометрії конструкції.

3.2.1 Збірка рами Mark4 V2 7"

Збірка карбонової рами Mark4 V2 (295 мм) проводилася шляхом послідовного з'єднання нижньої, середньої та верхньої пластин, чотирьох променів та бічних пластин для FPV-камери за допомогою гвинтів та алюмінієвих стійок (Рис. 3.2-3.3). В результаті було отримано жорстку та геометрично правильну основу для дрона.



Рис. 3.2 – Компоненти рами Mark4 V2 7" перед збіркою



Рис. 3.3 – Зібрана центральна частина рами з встановленими променями та стійками

3.2.2 Монтаж на раму двигунів EMAX ECO II 2807 6S 1300KV

Чотири безколекторні мотори EMAX ECO II 2807 було надійно закріплено на променях рами гвинтами з використанням фіксатора різьби. Силові проводи моторів було орієнтовано всередину рами та захищено обплетенням і термоусадкою для запобігання пошкодженням та зменшення вібрацій (Рис. 3.4 - 3.5)



Рис. 3.4 – Захист проводів мотора за допомогою обплетення та термоусадки



Рис. 3.5 – Усі чотири мотори EMAX ECO II 2807, встановлені на раму Mark4 V2

3.3 Монтаж та підключення електронних компонентів системи

Наступним етапом стало встановлення, паяння та підключення всіх бортових електронних компонентів згідно з розробленими схемами (п. 2.4).

3.3.1 Монтаж стеку та паяння силових ланцюгів

Плата ESC SpeedyBee BLS 60A була встановлена на раму через демпфуючі прокладки. До неї було припаяно силові проводи від роз'єму XT60 (з дотриманням полярності), захисний конденсатор (1000uF Low ESR) та трифазні проводи від усіх чотирьох моторів. (Рис. 3.6). Це забезпечило підключення силової частини рушійної системи.

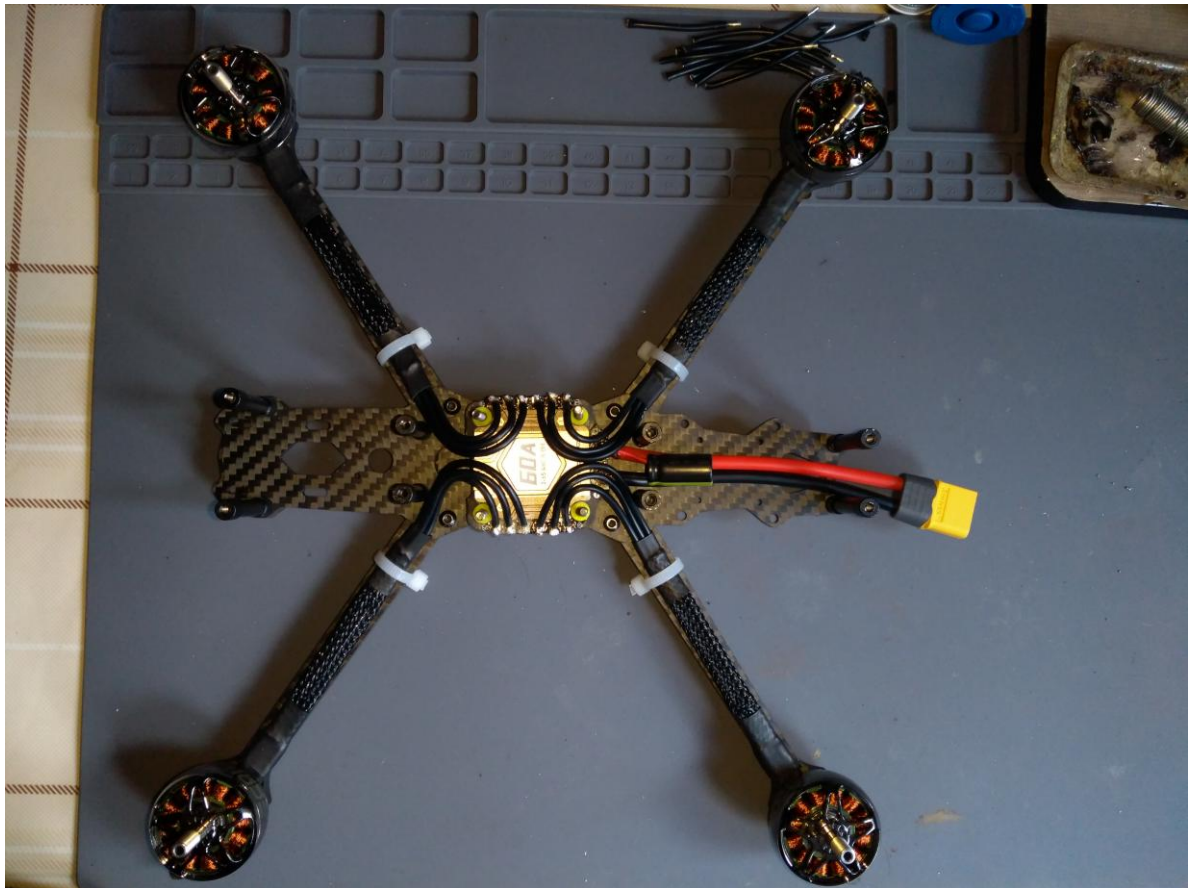


Рис. 3.6 – Плата ESC SpeedyBee BLS 60A з припаяними силовими проводами, конденсатором та проводами моторів

3.3.2 Монтаж польотного контролера та підключення периферійних модулів

Польотний контролер (FC) SpeedyBee F405 V3 було встановлено поверх плати ESC та з'єднано з нею штатним шлейфом. Після цього було послідовно підключено до відповідних портів FC наступні периферійні модулі:

FPV-камеру Foxeer T-Rex Micro встановлено у передній частині рами, підключено живлення та відеосигнал до VTX (Рис. 3.7).

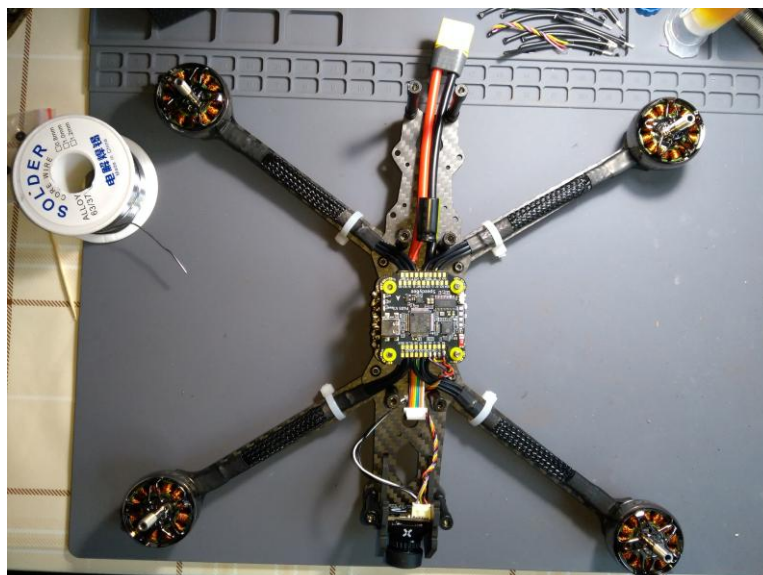


Рис. 3.7 – Монтаж польотного контролера та підключення FPV-камери
Foxeer T-Rex Micro

Відеопередавач (VTX) GEPRC MATEN 5.8G 2.5W розміщено на рамі, підключено живлення, відеовхід від камери, керуючий сигнал (IRC Tramp) до UART FC та FPV-антену (Рис. 3.8).

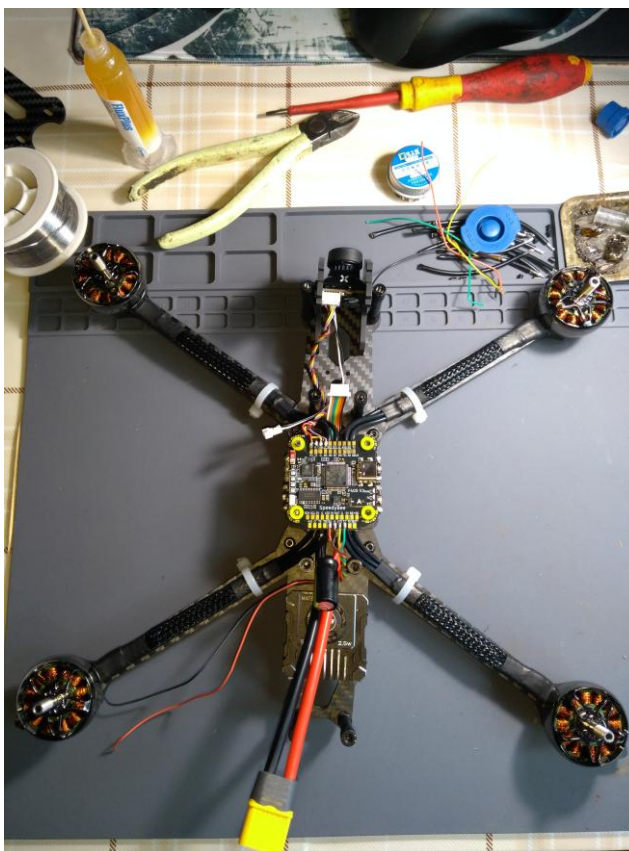


Рис. 3.8 – Монтаж та паяння відеопередавача VTX GEPRC MATEN 5.8G
2.5W

GPS-модуль Beitian BE-220 встановлено на стійці, підключено живлення та сигнальні проводи (TX/RX) до UART FC (Рис. 3.9).

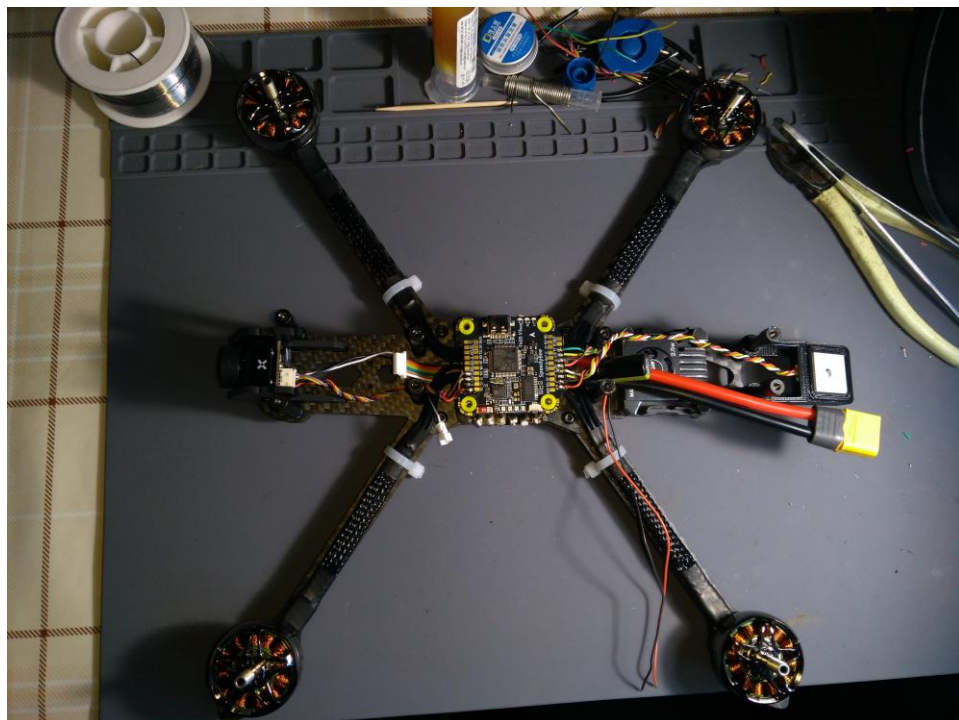


Рис. 3.9 – Монтаж та паяння GPS-модуля Beitian BE-220

Бузер iFlight YR50B_S підключено до виходів BZ+/BZ- на FC. Приймач HapruModel ES900 DUAL RX встановлено з рознесеними антенами та підключено до UART FC (живлення та CRSF) (Рис. 3.10).

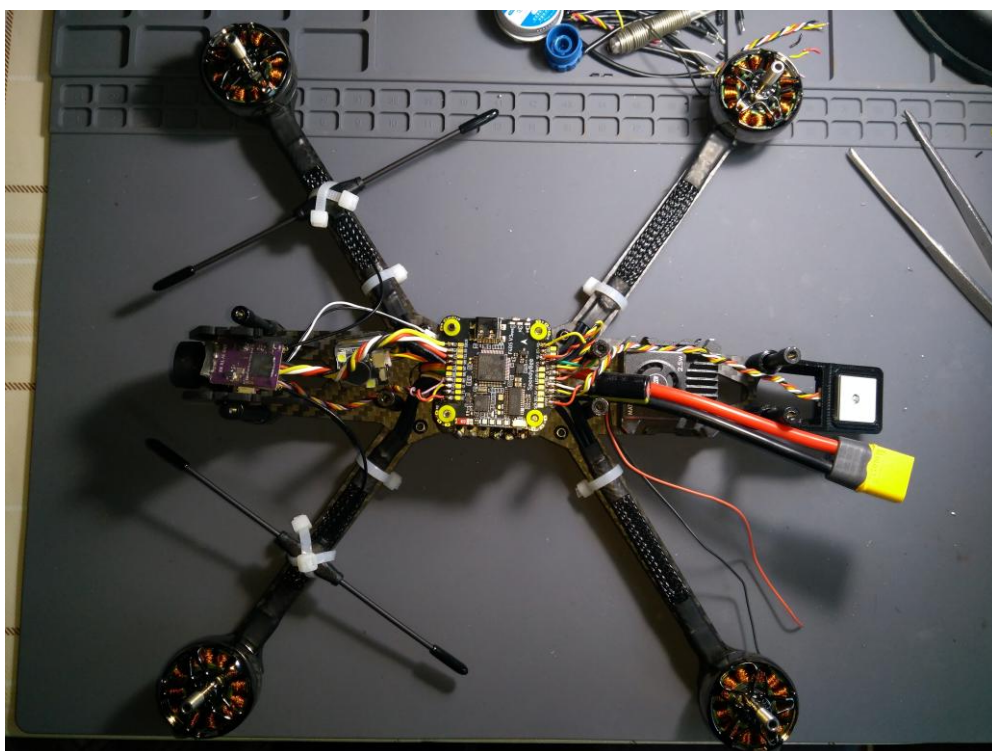


Рис. 3.10 – Монтаж та паяння бузера та приймача радіокерування

3.3.3 Фінальні перевірки та збірка конструкції

Перед першим поданням живлення було проведено візуальний огляд якості паяння та перевірку силових ланцюгів на відсутність короткого замикання за допомогою мультиметра та пристрою «smoke stopper» (з підключеною FPV-антенною до VTX). (Рис. 3.11)



Рис. 3.11 – Перевірка на коротке замикання за допомогою «smoke stopper»

Після успішної перевірки було завершено збірку рами, встановлено верхню пластину та надійно зафіксовано всі компоненти та проводи. (Рис. 3.12)



Рис. 3.12 – Остаточна збірка рами інспекційного дрона

На завершення механічної збірки було встановлено пропелери HQProp 7X3.5X3 на двигуни з дотриманням правильного напрямку обертання (Рис. 3.13)



Рис. 3.13 – Встановлення пропелерів на двигуни та фінальне закріплення елементів

3.4 Базове програмне налаштування польотного контролера у Betaflight Configurator

Після збірки було проведено первинну конфігурацію польотного контролера SpeedyBee F405 V3 (прошивка Betaflight 4.3.2) через Betaflight Configurator в режимі «Експерт».

3.4.1 Калібрування акселерометра та гіроскопа

Здійснено калібрування акселерометра на рівній поверхні через вкладку «Налаштування» для коректного визначення горизонтального положення (детальніше див. Рис. А.1 у Додатку А). Робота гіроскопа перевірена після автоматичного калібрування.

3.4.2 Налаштування портів (UARTs)

У вкладці «Порти» було сконфігуровано UART-порти для підключених пристроїв: UART1 – VTX (IRC Tramp), UART2 – приймач (Serial RX, CRSF), UART4 – Bluetooth (MSP), UART5 – ESC Telemetry, UART6 – GPS (57600 baud) (детальніше див. Рис. А.2 у Додатку А).

3.5 Конфігурація основних параметрів контролера польоту та ESC

Наступним етапом стало налаштування ключових параметрів FC та ESC для оптимальної роботи.

3.5.1 Оновлення та налаштування прошивки ESC у BLHeli Configurator

Перевірено версію прошивки ESC (J-H-40, 16.9) та встановлено оптимальні параметри через BLHeli Configurator: PWM Frequency – 96kHz, Commutation Enhancement – CE, Startup Power – 0.25, Temperature Protection – 140 °C, Motor Timing – MediumHigh та інші (Рис. 3.14)

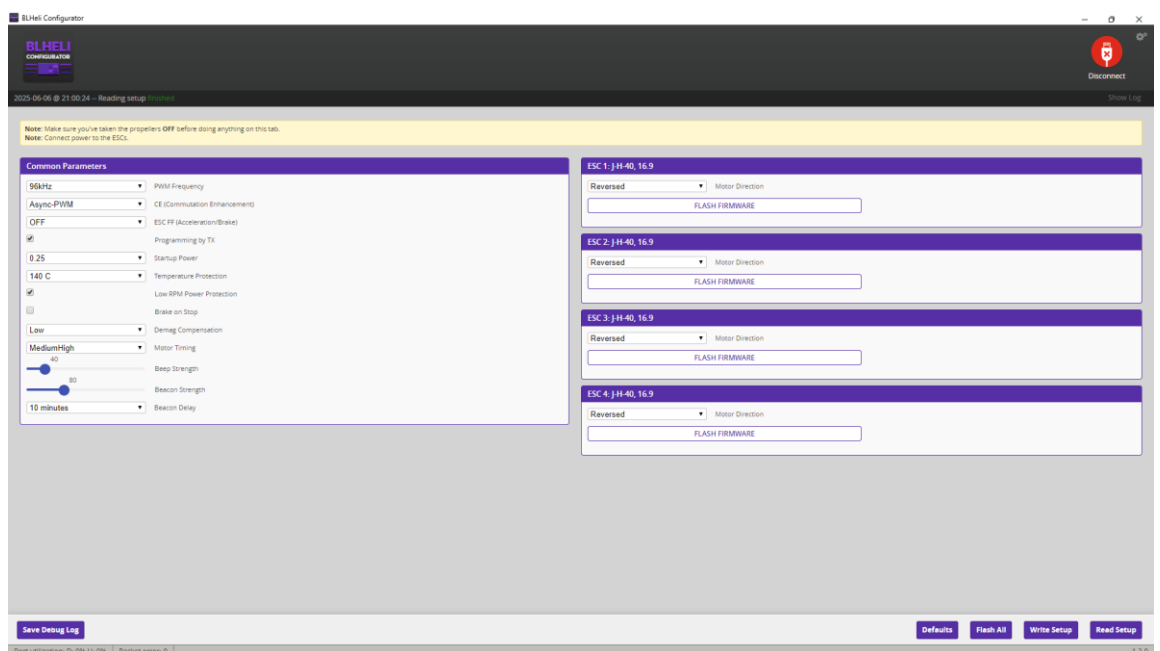


Рис. 3.14 – Налаштування параметрів ESC у BLHeli Configurator

3.5.2 Налаштування параметрів ESC у Betaflight

У Betaflight Configurator було обрано протокол DSHOT600 та активовано двонаправлений DShot для RPM-фільтрації. Напрямок обертання моторів було перевірено та скориговано (зі знятими пропелерами) відповідно до схеми «QUAD X props out» за допомогою «Майстра налаштування напрямку обертання мотора» (Рис. 3.15-3.16; також див. Рис. А.16 у Додатку А).

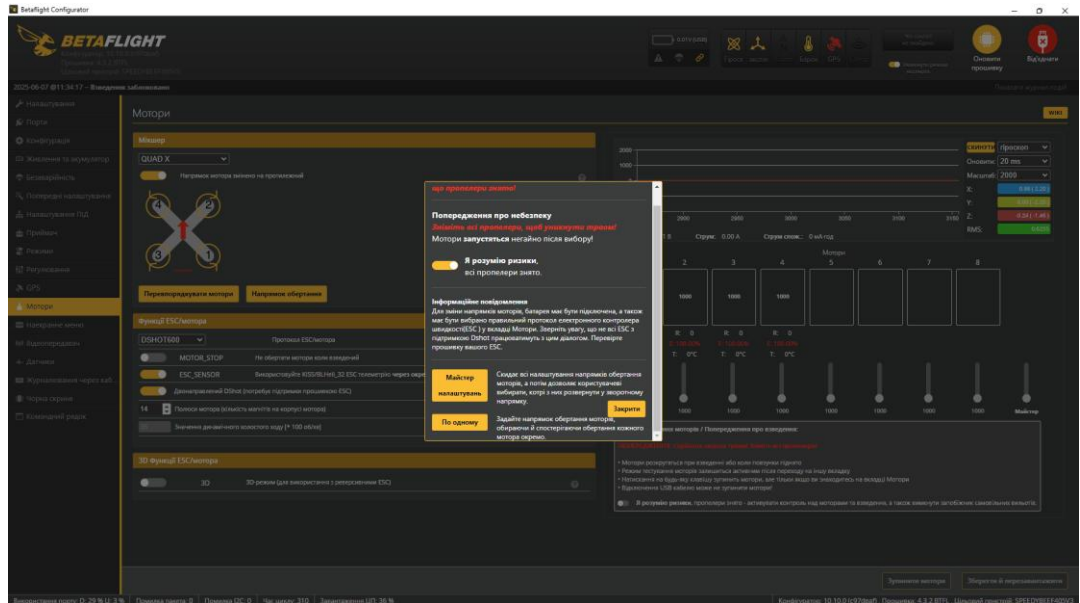


Рис. 3.15 – Інтерфейс налаштування напрямку обертання моторів у Betaflight Configurator

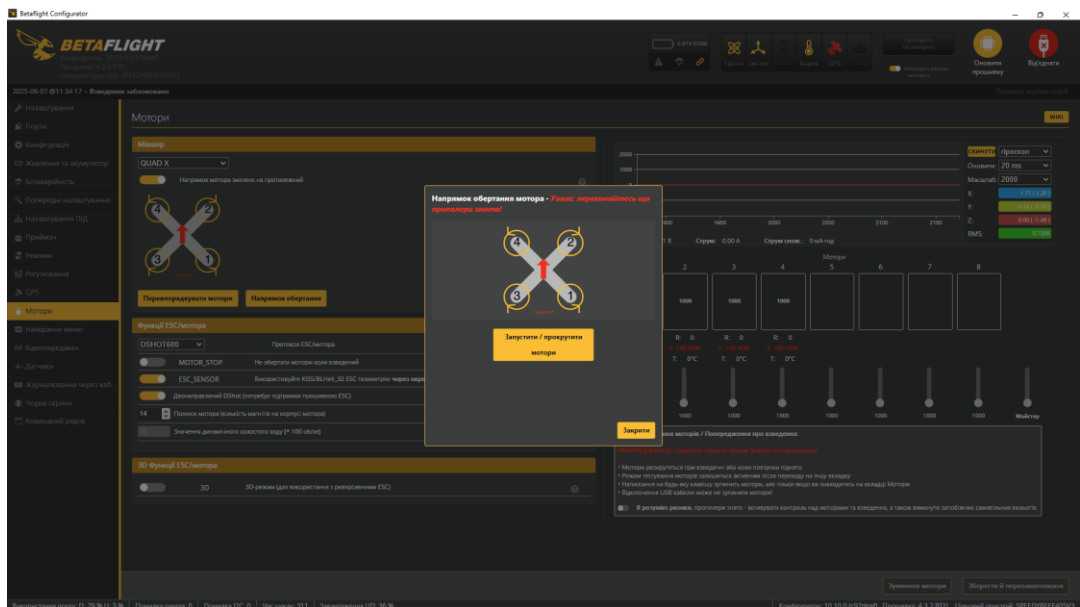


Рис. 3.16 – Майстер налаштувань напрямку обертання мотора у Betaflight Configurator

3.5.3 Налаштування режимів польоту

У вкладці «Режими» на перемикачі апаратури було призначено основні режими: ARM, ANGLE, HORIZON, ACRO/AIRMODE, GPS RESCUE, BEEPER, BLACKBOX (детальніше див. Рис. А.13 та А.14 у Додатку А).

3.6 Налаштування GPS-модуля та пов'язаних функцій

У Betaflight Configurator було налаштовано протокол GPS-модуля (UBLOX), частоту оновлення та параметри функції «GPS Порятунк» (мінімальна кількість супутників, висота повернення тощо). Також налаштовано відображення GPS-даних в OSD (детальніше див. Рис. А.6, А.7, А.15, А.17-А.19 у Додатку А). Роботу GPS перевірено на відкритій місцевості.

3.7 Методика та результати комплексного тестування інспекційного повітряного дрона

Заключним етапом стала перевірка працездатності та оцінка льотних характеристик.

3.7.1 Стендові випробування

Проведено індивідуальне тестування кожного мотора через Betaflight Configurator (зі знятими пропелерами) для оцінки плавності роботи та відсутності вібрацій. Підтверджено правильність напрямку обертання.

3.7.2 Тестування базових польотних характеристик у приміщенні

Після успішного завершення стендових випробувань рушійної системи, було проведено перші тестові польоти інспекційного дрона у контрольованих

умовах закритого приміщення. Метою цих випробувань була перевірка основних польотних характеристик: здатність до зльоту, утримання позиції (зависання) та керованої посадки, а також оцінка реакції дрона на базові команди керування по осях крену (Roll), тангажу (Pitch), ристання (Yaw) та газу (Throttle).

Тестування проводилося в умовах відсутності вітру та інших зовнішніх збурень, що дозволило максимально точно оцінити власні льотні якості апарата. Для безпеки та кращого контролю перші зльоти здійснювалися з м'якої та рівної поверхні (Рис. 3.17)



Рис. 3.17 – Інспекційний дрон у стартовій позиції перед тестовим польотом у приміщенні

Під час тестових польотів було виконано наступні дії та зафіксовано спостереження:

- перевірено коректність спрацювання команди взведення моторів з апаратури радіокерування.
- здійснено плавний підйом дрона на невелику висоту (близько 10-30 см над поверхнею). Оцінювалася стабільність дрона під час набору висоти та реакція на зміну газу.
- проведено спроби утримання дрона в одній точці на невеликій висоті.

(Рис. 3.18)



Рис. 3.18 – Інспекційний дрон у режимі зависання на висоті ~10 см над поверхнею під час тестування у приміщенні

– було відзначено, що через роботу переважно в акро-режимі (ACRO), не налаштованої мертвої зони стіків на початковому етапі та неідеальну рівність м'якої стартової поверхні, спостерігалось незначне зміщення дрона у повітрі під час зависання. Стабільність утримання позиції значною мірою залежала від навичок пілота та точності роботи стіками апаратури.

– здійснено короткі та плавні рухи по осях крену (Roll), тангажу (Pitch) та рискання (Yaw) для оцінки керованості та передбачуваності реакції дрона. Загалом, дрон адекватно реагував на команди.

– проведено кілька циклів плавної посадки на стартову поверхню.

Перші тестові польоти у приміщенні показали загальну працездатність зібраного інспекційного дрона та його здатність виконувати базові польотні маневри. Виявлене незначне зміщення під час зависання вказує на необхідність подальшого точного налаштування параметрів польотного контролера (зокрема, ПІД-регуляторів та мертвих зон стіків), а також проведення випробувань на більш жорсткій та рівній поверхні для об'єктивнішої оцінки стабільності.

3.8 Висновок за розділом 3

У рамках третього розділу було детально описано та практично реалізовано комплекс робіт, пов'язаних зі створенням, програмним налаштуванням та первинними випробуваннями інспекційного повітряного робота. Цей розділ є ключовим у переході від теоретичного обґрунтування та вибору компонентів до фізичного втілення спроектованої системи.

На початковому етапі було ретельно підготовлено необхідний інструментарій та матеріали, що забезпечило належні умови для якісного виконання всіх подальших операцій зі збірки та паяння. Це включало як спеціалізовані інструменти для роботи з FPV-компонентами, так і стандартні засоби для механічних та електромонтажних робіт.

Основна частина робіт була присвячена послідовній збірці конструктивних елементів дрона. Було здійснено монтаж карбонової рами Mark4 V2, що забезпечує міцність та жорсткість конструкції, а також встановлення чотирьох безколекторних моторів EMAX ECO II 2807 на промені рами. Особливу увагу приділено надійності кріплень та захисту проводів моторів для запобігання їх пошкодженню під час експлуатації та мінімізації вібрацій.

Центральним та найбільш відповідальним етапом стало встановлення та підключення всіх електронних компонентів системи. Було успішно змонтовано інтегрований стек, що складається з плати регуляторів обертів двигунів SpeedyBee BLS 60A та польотного контролера SpeedyBee F405 V3. Ретельно виконано паяння всіх силових ланцюгів, включаючи підключення акумуляторного роз'єму XT60, захисного конденсатора для стабілізації живлення, а також фазних проводів від моторів до ESC. Після цього було здійснено підключення всієї необхідної периферії до польотного контролера: аналогової FPV-камери Foxeer T-Rex Micro для візуального контролю, потужного відеопередавача GEPRC MATEN 5.8G 2.5W з відповідною антеною для передачі відеосигналу, GPS-модуля Beitian BE-220 для навігації та функцій безпеки, приймача радіокерування HappyModel ES900 DUAL RX для прийому

команд від оператора, та звукового сигналізатора (бузера) iFlight YR50B_S для полегшення пошуку дрона. Всі підключення виконувалися згідно з розробленими у другому розділі принциповими схемами та з ретельним дотриманням розпіновки компонентів. Завершальним кроком апаратної збірки стали фінальні перевірки на відсутність коротких замикань за допомогою мультиметра та пристрою «smoke stopper», остаточне компонування всіх елементів на рамі, надійна фіксація проводів та встановлення пропелерів.

Після завершення фізичної збірки було проведено етап базового програмного налаштування польотного контролера за допомогою програмного забезпечення Betaflight Configurator. Це включало калібрування акселерометра для точного визначення горизонтального положення, а також детальну конфігурацію UART-портів для забезпечення коректної взаємодії польотного контролера з усіма підключеними периферійними пристроями (приймачем, GPS, VTX).

Наступним кроком стала більш поглиблена конфігурація основних параметрів польотного контролера та регуляторів обертів двигунів. Було перевірено та налаштовано параметри прошивки ESC у BLHeli Configurator для оптимізації їхньої роботи з обраними моторами, включаючи частоту ШІМ, параметри комутації та таймінги. У Betaflight Configurator було налаштовано протокол зв'язку з ESC (DSHOT600), активовано двонаправлений DShot для можливості використання RPM-фільтрації та скориговано напрямки обертання моторів відповідно до обраної схеми «QUAD X props out». Також було налаштовано та призначено на перемикачі апаратури радіокерування необхідні режими польоту (ARM, ANGLE, HORIZON, ACRO/AIRMODE, GPS RESCUE, BEEPER, BLACKBOX), що забезпечує гнучкість керування та підвищує безпеку експлуатації. Окрему увагу було приділено налаштуванню GPS-модуля та пов'язаних з ним функцій, зокрема режиму «GPS Порятунк», що є важливим елементом системи безпеки.

Завершальним етапом робіт, описаних у розділі, стало проведення комплексного тестування зібраного та налаштованого інспекційного дрона.

Стендові випробування підтвердили коректну роботу рушійної системи та правильність налаштування напрямку обертання моторів. Перші тестові польоти у приміщенні дозволили оцінити базові льотні характеристики, такі як здатність до зльоту, стабільність зависання, реакцію на команди керування та керованість під час посадки. Хоча первинні тести в акро-режимі виявили певне зміщення під час зависання, що пов'язано з відсутністю налаштованої мертвої зони стіків та особливостями стартової поверхні, загалом вони підтвердили працездатність зібраної системи.

Таким чином, у результаті виконання комплексу робіт, було успішно створено та первинно налаштовано апаратну та програмну частину інспекційного повітряного робота. Зібраний дрон продемонстрував свою функціональність та принципову готовність до виконання поставлених завдань. Проведені етапи є важливою основою для подальших, більш поглиблених польотних випробувань у реальних умовах експлуатації, детального тюнінгу льотних характеристик та, зрештою, практичного застосування розробленого дрона для візуальної інспекції об'єктів інфраструктури, що може бути предметом подальших досліджень або наступних етапів проєкту.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз потенційних небезпек та шкідливих факторів

При виконанні робіт, пов'язаних зі створенням та використанням інспекційного дрона, виконавець може зіткнутися з низкою небезпечних та шкідливих факторів. Їх своєчасне виявлення та розуміння є запорукою безпечної роботи.

– Електротравматизм – ризик ураження електричним струмом існує при роботі з компонентами під напругою (бортова мережа дрона до 25.2 В, мережа 220 В для паяльника та зарядного пристрою), при пошкодженні ізоляції, неправильному використанні вимірювальних приладів або накопиченні статичної електрики [13, п. 1.6]. Наслідки можуть варіюватися від легкого поколювання до серйозних уражень.

– Механічні травми – обертові пропелери, що можуть спричинити порізи та рвані рани. Небезпеку також становлять уламки компонентів при руйнуванні або випадкове увімкнення моторів під час налаштування.

– Термічні опіки – виникають при контакті з нагрітим паяльником (до 300-450°C), розплавленим припоєм, гарячим флюсом, а також перегрітими електронними компонентами дрона (ESC, VTX, мотори) або зарядним пристроєм.

– Вплив електромагнітних випромінювань (ЕМП) – джерелами ЕМП є відеопередавач (5.8 ГГц, до 2.5 Вт), передавальні модулі апаратури радіокерування (915 МГц до 1 Вт, 2.4 ГГц) та Bluetooth-модулі. Тривалий інтенсивний вплив може негативно позначитися на здоров'ї [11, п. 1.9 ГОСТ 12.1.006-84].

– Небезпеки, пов'язані з LiPo акумуляторами – літій-полімерні акумулятори (наприклад, CNHL G+Plus 4000mAh 6S) при неправильній експлуатації (перезаряд, глибокий розряд, коротке замикання, механічне

пошкодження) можуть займатися, вибухати та виділяти токсичні гази.

4.2 Заходи безпеки при складанні та налаштуванні дрона

Для мінімізації ризиків, пов'язаних з вищезазначеними факторами, під час складання та налаштування дрона необхідно дотримуватися наступних заходів безпеки:

- освітлення – забезпечення достатнього комбінованого (загальне + місцеве) освітлення робочої зони (не менше 300-500 люкс для точних робіт), відсутність різких тіней та відблисків, використання джерел світла з хорошою передачею кольору [13, п. 1.6, 2.3, 2.6].

- вентиляція – наявність загальнообмінної вентиляції та обов'язкове використання місцевої витяжної вентиляції (димовловлювача) під час паяння для видалення шкідливих випарів [11, Розділ III, п. 3.15; Розділ IV, п. 12.6].
Періодичне провітрювання приміщення.

- заземлення та антистатичний захист – підключення електрообладнання (паяльник, зарядний пристрій) до заземлених розеток. Використання антистатичного килимка та браслета при роботі з чутливими електронними компонентами [11, п. 3.5 ГОСТ 12.1.030-81; 17].

Основні роботи зі складання та монтажу проводити при відключеному акумуляторі.

Використовувати тільки справний електроінструмент з цілою ізоляцією.

Суворо дотримуватися полярності при підключенні компонентів.

Перед першим увімкненням перевіряти систему на відсутність коротких замикань (мультиметр, «smoke stopper»).

Ретельно ізолювати всі паяні з'єднання термоусадковою трубкою.

Використовувати справний паяльник з регулюванням температури та термостійку підставку [11, Розділ IV, п. 12.2, 12.5].

Застосовувати засоби індивідуального захисту (захисні окуляри).

Контролювати температуру жала, регулярно його очищувати.

Зарядка. Використовувати тільки спеціалізований зарядний пристрій з функцією балансування (наприклад, SkyRC S100 Neo), контролювати параметри заряду, заряджати на вогнестійкій поверхні та під наглядом, бажано у вогнестійкому мішку. Не заряджати пошкоджені акумулятори.

Експлуатація. Контролювати рівень розряду, захищати від механічних пошкоджень та коротких замикань, уникати перегріву.

Зберігання. Зберігати у режимі «Storage» (3.8-3.85V на комірку) у прохолодному, сухому, вогнестійкому місці, окремо від дрона.

Утилізація. Повністю розряджати перед здачею у спеціалізовані пункти прийому.

4.3 Забезпечення безпеки під час тестових польотів та загальні заходи пожежної безпеки

Тестові польоти є етапом підвищеної небезпеки, тому вимагають особливої уваги до заходів безпеки.

– Передпольотна підготовка – ретельний візуальний огляд дрона (конструкція, пропелери, кріплення, проводка), перевірка заряду акумуляторів (дрона та апаратури), коректності вибору моделі на пульті, роботи органів керування, зв'язку з приймачем, ініціалізації FC, роботи OSD та FPV-системи, реакції моторів (без пропелерів), фіксації GPS (якщо використовується).

В умовах воєнного стану (Україна, з 24.02.2022). Польоти цивільних БПЛА на відкритому повітрі ЗАБОРОНЕНІ без спеціального дозволу від відповідних військових адміністрацій та/або Генерального штабу ЗСУ. Незаконні польоти можуть призвести до кримінальної відповідальності (статті 109-114 ККУ). Пріоритетом є безпека держави та недопущення розголошення конфіденційної інформації.

Загальні критерії (при отриманні дозволу або для закритих зон). Відсутність людей та тварин; віддаленість від аеродромів, скупчень людей, щільної забудови, об'єктів під охороною; відкритий простір з хорошою

видимістю; відсутність значних перешкод та джерел сильних ЕМП; дотримання обмежень по висоті та швидкості; сприятливі погодні умови. Найбільш безпечний варіант в поточних умовах – спеціально обладнані закриті приміщення або офіційно узгоджені відкриті території.

- Дії в позаштатних ситуаціях – оператор повинен бути готовим до:
 - втрати візуального/відео зв'язку – спробувати утримати висоту, активувати RTH (якщо налаштовано).
 - втрати сигналу радіокерування – знати роботу налаштування Failsafe (Land, Hover, RTH).
 - низького заряду акумулятора – негайно повертатися та здійснювати посадку.
 - раптової появи перешкод/людей – припинити рух, набрати висоту, облетіти або здійснити посадку. Пріоритет – безпека людей.
 - нестабільної роботи дрона – спробувати безпечно посадити, активувати Failsafe або контролювано «вимкнути» у безпечній зоні.

Після інциденту – провести огляд дрона та аналіз причин.

Дотримання «Правил пожежної безпеки в Україні» [12].

Утримання робочого місця в чистоті, вільним від легкозаймистих матеріалів.

Наявність справних первинних засобів пожежогасіння (порошковий/вуглекислотний вогнегасник) та вміння ними користуватися.

Заборона куріння та використання відкритого вогню у непередбачених для цього місцях.

Знання порядку дій у разі виникнення пожежі (повідомлення служби 101, евакуація, гасіння).

4.4 Висновок за розділом 4

У даному розділі було проаналізовано основні небезпечні та шкідливі фактори, що супроводжують процес розробки, складання та експлуатації

інспекційного повітряного робота, включаючи електротравматизм, механічні травми, термічні опіки, вплив ЕМП та специфічні ризики, пов'язані з LiPo акумуляторами. На основі цього аналізу та з урахуванням чинного законодавства України визначено комплекс необхідних заходів безпеки. Ці заходи охоплюють вимоги до організації робочого місця (освітлення, вентиляція, заземлення), правила електробезпеки при роботі з компонентами та інструментом, безпечне поводження з паяльним обладнанням та LiPo акумуляторами, а також забезпечення безпеки під час тестових польотів (передпольотна підготовка, вибір зони з урахуванням режиму воєнного стану, дії в позаштатних ситуаціях) та загальні заходи пожежної безпеки. Комплексне дотримання викладених вимог та рекомендацій спрямоване на мінімізацію ризиків та створення безпечних умов для виконання даної кваліфікаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У рамках виконання кваліфікаційної роботи було успішно досягнуто поставленої мети – розроблено, сконструйовано, програмно налаштовано та проведено первинні випробування функціонального прототипу інспекційного повітряного робота.

В результаті виконання кваліфікаційної роботи створено функціональний прототип інспекційного повітряного робота на базі відкритої FPV-платформи, який забезпечує виконання таких основних функцій, як:

- стабільний керований політ у ручному (FPV) та частково стабілізованих режимах;
- передача аналогового відеосигналу в реальному часі на відеошолом оператора;
- можливість навігації за допомогою GPS та реалізація функції автоматичного повернення до точки старту;
- звукова сигналізація для полегшення пошуку;
- запис польотних даних («чорна скриня») для подальшого аналізу.

Розроблений інспекційний повітряний робот, завдяки своїй маневреності, можливості польоту на близьких відстанях та якісній FPV-системі, має потенціал для застосування у візуальному огляді різноманітних об'єктів інфраструктури з метою виявлення дефектів, оцінки стану конструкцій та моніторингу.

Для розробки апаратної та програмної частини самостійно опрацьовано значний обсяг технічної документації на компоненти, вивчено принципи роботи FPV-систем, протоколів радіокерування, налаштування польотних контролерів у середовищі Betaflight та конфігурації ESC. Використано сучасні підходи до компонування та збірки FPV-дронів. Розглянуто питання охорони праці.

Таким чином, поставлені у кваліфікаційної роботі завдання виконано, а розроблений інспекційний повітряний робот продемонстрував свою працездатність та відповідність основним функціональним вимогам. Подальші роботи будуть спрямовані на більш глибокий тюнінг польотних характеристик, інтеграцію додаткових сенсорів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зарубін І. С. Огляд сучасних повітряних роботів / І. С. Зарубін // Автоматизація та Приладобудування : збірник студентських наукових статей. Харків : ХНУРЕ, 2024. Вип. 1. С. 144–149.
2. FPV drone. URL: https://www.wikiwand.com/en/articles/FPV_drone (дата звернення: 09.06.2025).
3. Multirotor. URL: <https://www.wikiwand.com/en/articles/Multirotor> (дата звернення: 09.06.2025).
4. Unmanned aerial vehicle. URL: https://www.wikiwand.com/en/articles/Unmanned_aerial_vehicle (дата звернення: 09.06.2025).
5. Radio-controlled vehicle. URL: https://www.wikiwand.com/en/articles/Radio-controlled_vehicle (дата звернення: 09.06.2025).
6. Radio-controlled aircraft. URL: https://www.wikiwand.com/en/articles/Radio-controlled_aircraft (дата звернення: 09.06.2025).
7. VTOL. URL: <https://www.wikiwand.com/en/articles/VTOL> (дата звернення: 09.06.2025).
8. Мультикоптер. URL: <https://www.wikiwand.com/uk/%D0%9C%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B5%D1%80> (дата звернення: 09.06.2025).
9. Inspection. URL: <https://www.wikiwand.com/en/articles/Inspection> (дата звернення: 09.06.2025).
10. Pöcher, P.K. (2018). Drone Design and Construction for Indoor Inspection Scenarios. Master's thesis. URL: <http://hdl.handle.net/11250/2616155>
11. Правила охорони праці під час паяльних робіт: затв. наказом Державної служби з питань праці від 03.02.2014 р. № 13. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0513-14#Text> (дата звернення: 09.06.2025).

12. Правила пожежної безпеки в Україні: затв. наказом МВС України від 30.12.2014 р. № 1417. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text> (дата звернення: 09.06.2025).

13. Інструкція з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування. URL: <https://osvita-docs.com/node/337> (дата звернення: 09.06.2025).

ДОДАТОК А

СКРІНШОТИ НАЛАШТУВАНЬ ПОЛЬОТНОГО КОНТРОЛЕРА У BETAFLIGHT CONFIGURATOR (РЕЖИМ ЕКСПЕРТА)

У даному додатку представлені скріншоти ключових вкладок та налаштувань програмного забезпечення Betaflight Configurator, які були використані для конфігурації польотного контролера SpeedyBee F405 V3 розроблюваного інспекційного повітряного робота. Налаштування проводилися в режимі «Експерт» для доступу до всіх параметрів.

А.1 Вкладка «Налаштування»

На вкладці «Налаштування» здійснюється калібрування основних сенсорів, доступ до інформації про систему та прошивку, а також функції скидання налаштувань та переведення польотного контролера у режим DFU для оновлення прошивки.

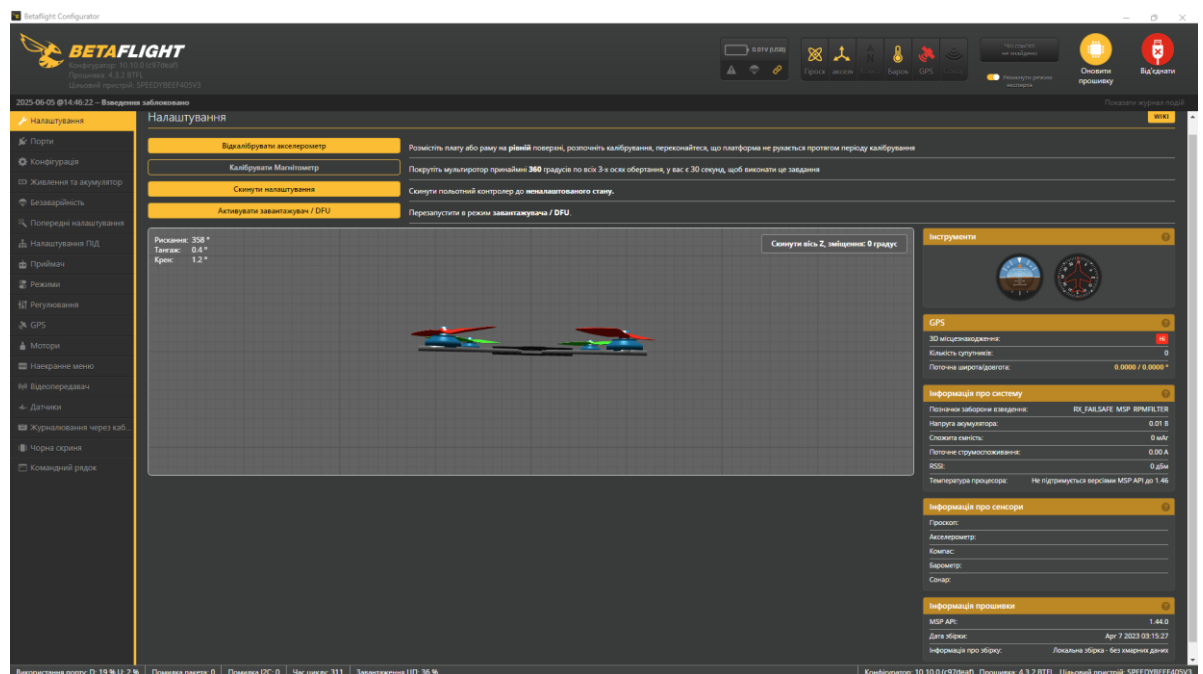


Рис. А.1 – Вкладка «Налаштування» у Betaflight Configurator

А.2 Вкладка «Порти»

Вкладка «Порти» дозволяє конфігурувати UART-порти польотного контролера для підключення різноманітних периферійних пристроїв, таких як приймач радіокерування, GPS-модуль, відеопередавач (для керування через SmartAudio/IRC Tramp) та інші.

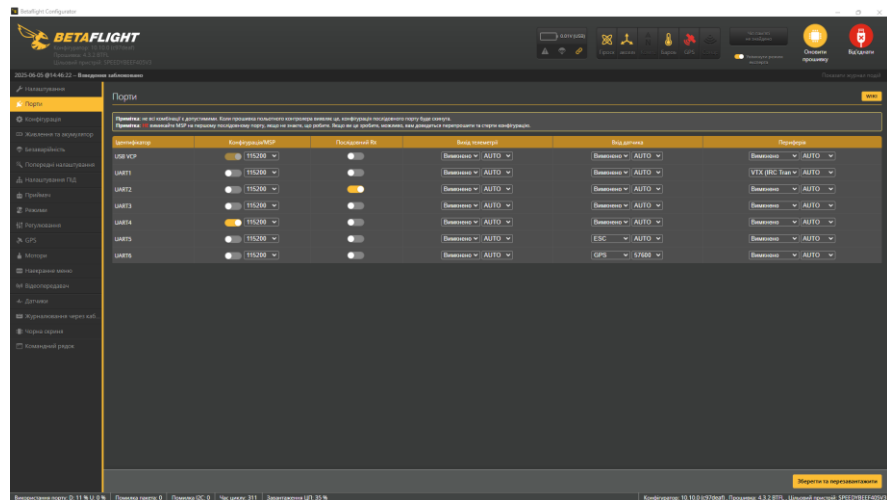


Рис. А.2 – Вкладка «Порти» у Betaflight Configurator

А.3 Вкладка «Конфігурація»

На вкладці «Конфігурація» зосереджені основні налаштування системи, що визначають поведінку дрона, роботу сенсорів, параметри безпеки та інші важливі функції.

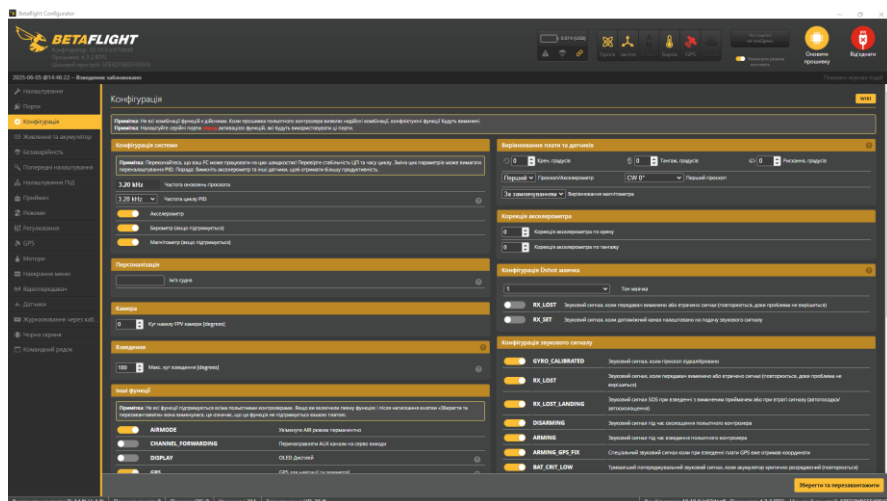


Рис. А.3 – Вкладка «Конфігурація», частина 1

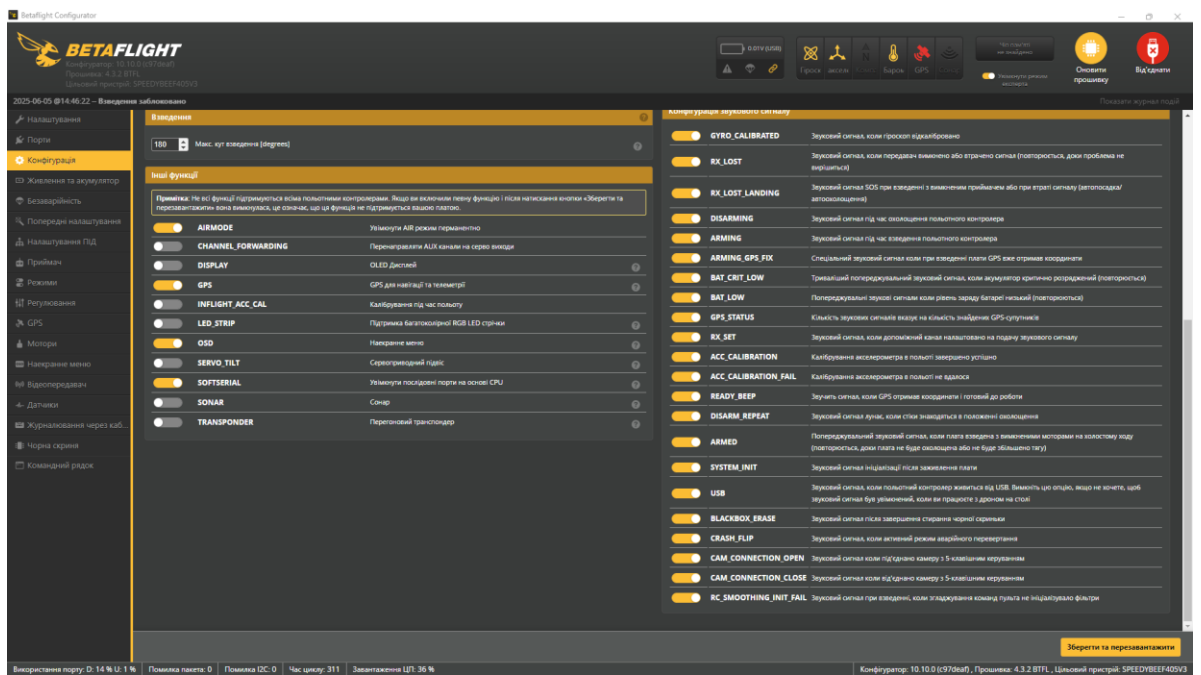


Рис. А.4 – Вкладка «Конфігурація», частина 2

А.4 Вкладка «Живлення та акумулятор»

Ця вкладка дозволяє налаштувати параметри моніторингу стану акумуляторної батареї, калібрування датчиків напруги та струму, а також встановити пороги для попереджень про низький заряд.

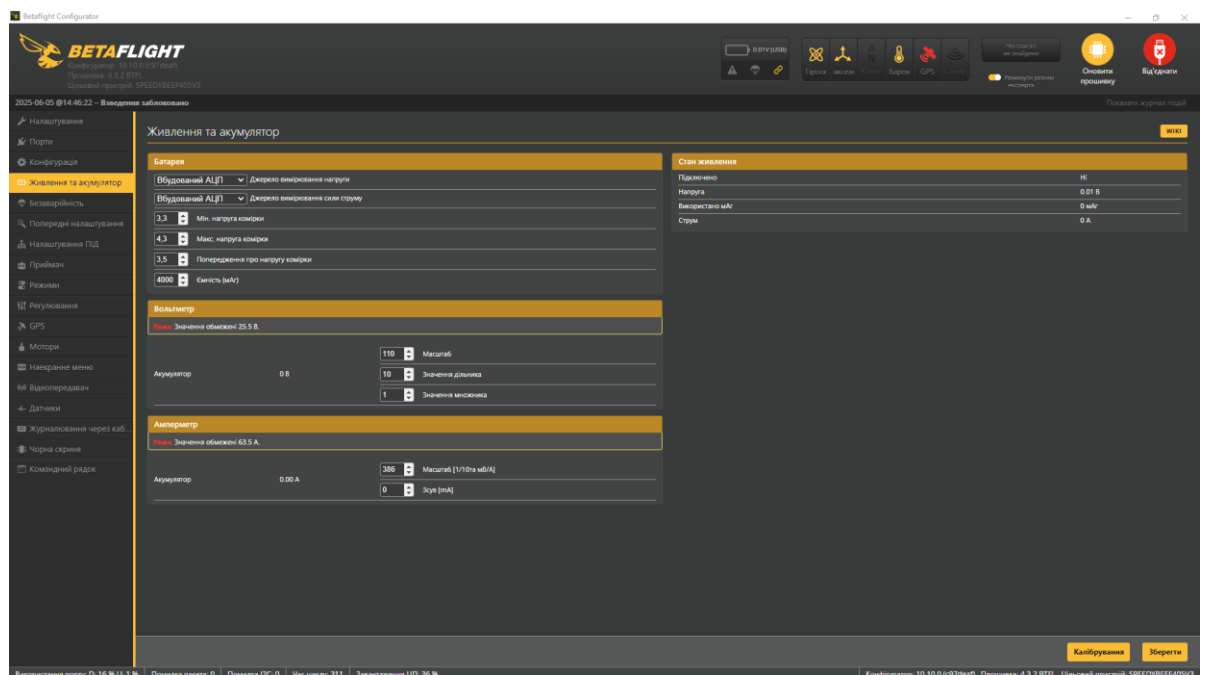


Рис. А.5 – Вкладка «Живлення та акумулятор» у Betaflight Configurator

А.5 Вкладка «Безаварійність»

Налаштування на цій вкладці визначають поведінку дрона у разі втрати зв'язку з апаратурою радіокерування (Failsafe). Важливо правильно налаштувати цю функцію для забезпечення безпеки та можливості автоматичного повернення або посадки дрона.

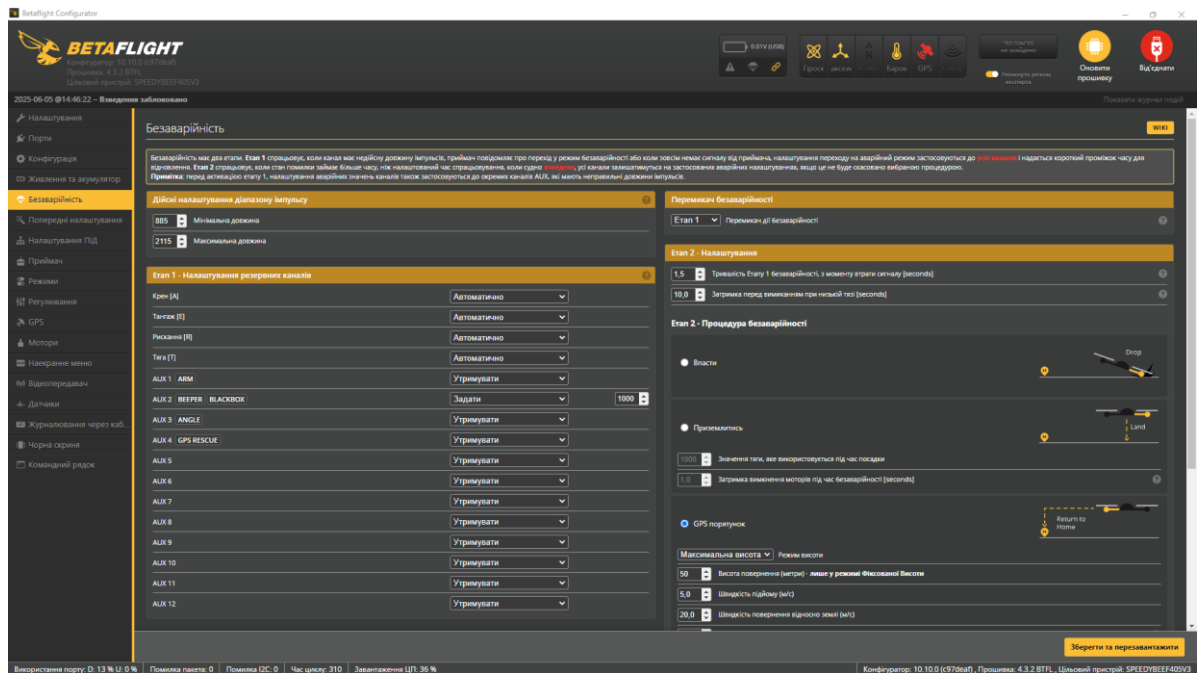


Рис. А.6 – Вкладка «Безаварійність», частина 1

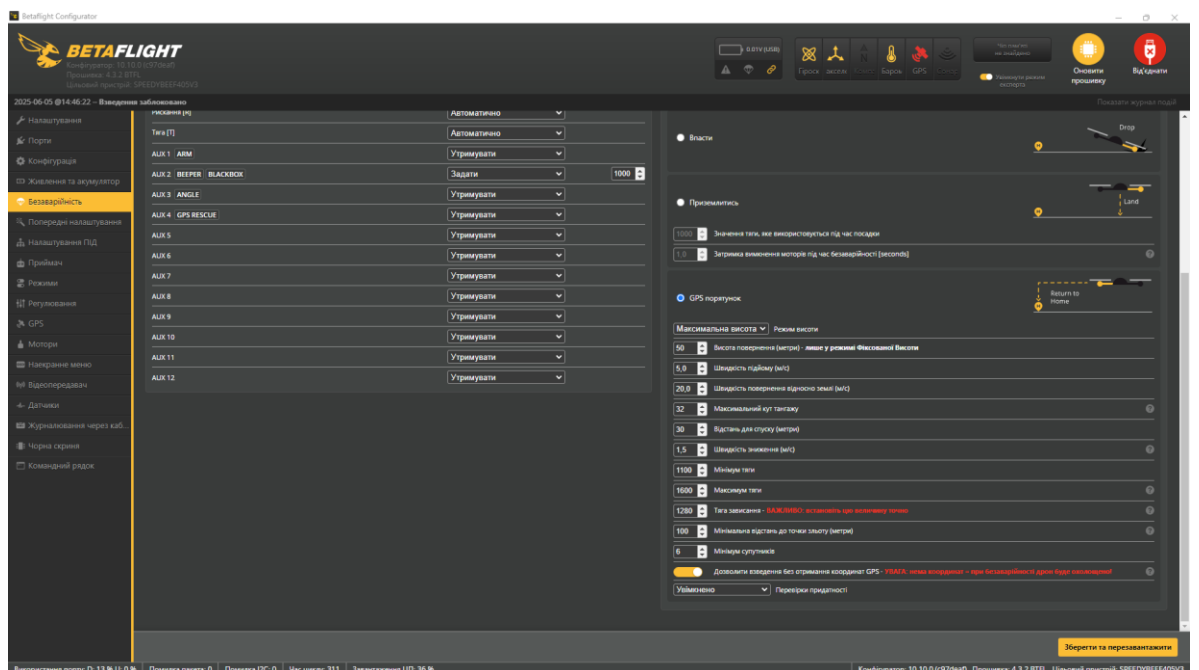


Рис. А.7 – Вкладка «Безаварійність», частина 2

А.6 Вкладка «Налаштування ПІД»

Ця вкладка є однією з найважливіших для досягнення оптимальних льотних характеристик. Вона дозволяє точно налаштувати коефіцієнти пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора, а також параметри кутових швидкостей (rates) та фільтрів.

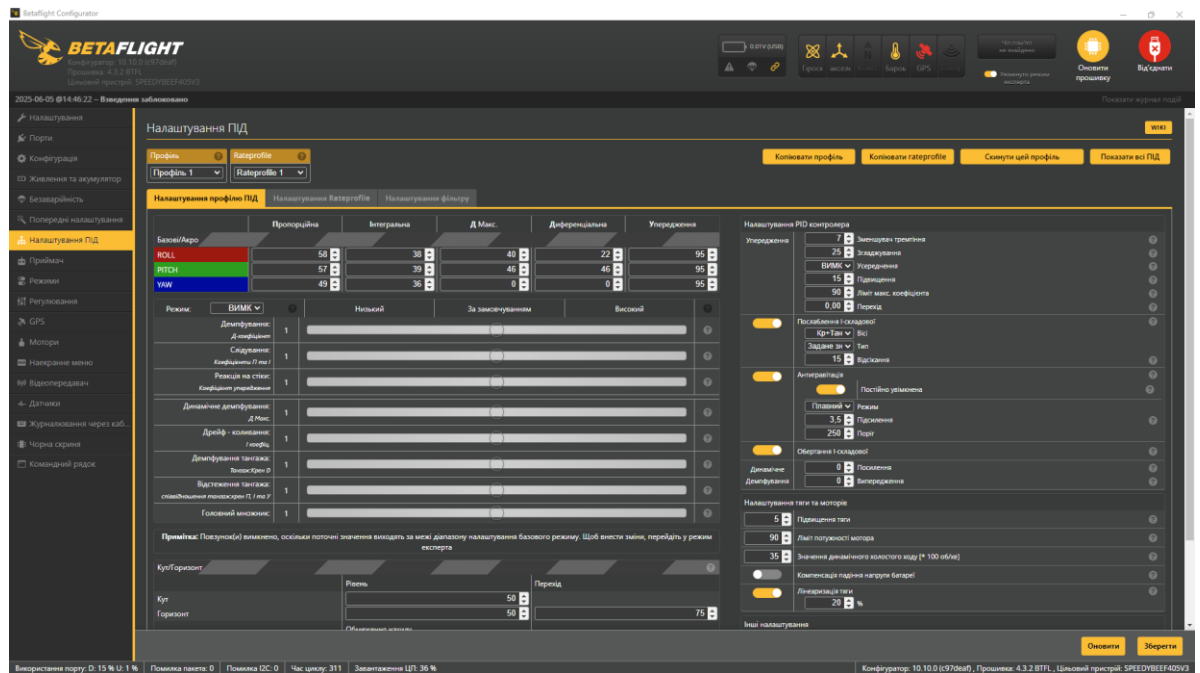


Рис. А.8 – Вкладка «Налаштування ПІД», частина 1

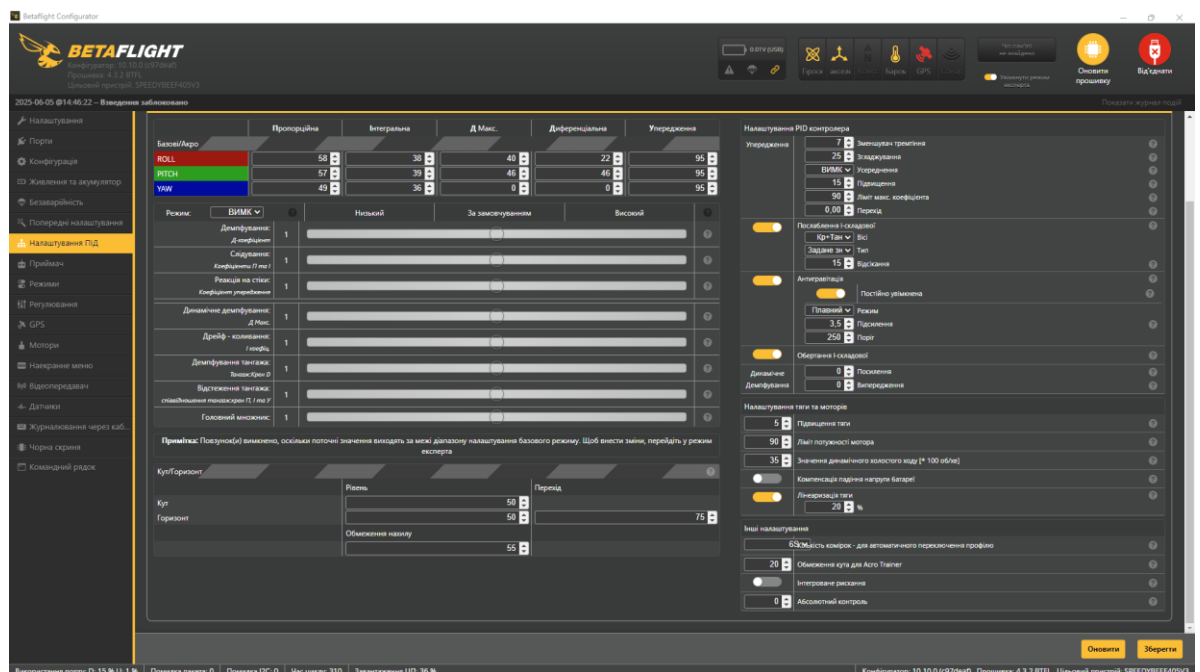


Рис. А.9 – Вкладка «Налаштування ПІД», частина 2

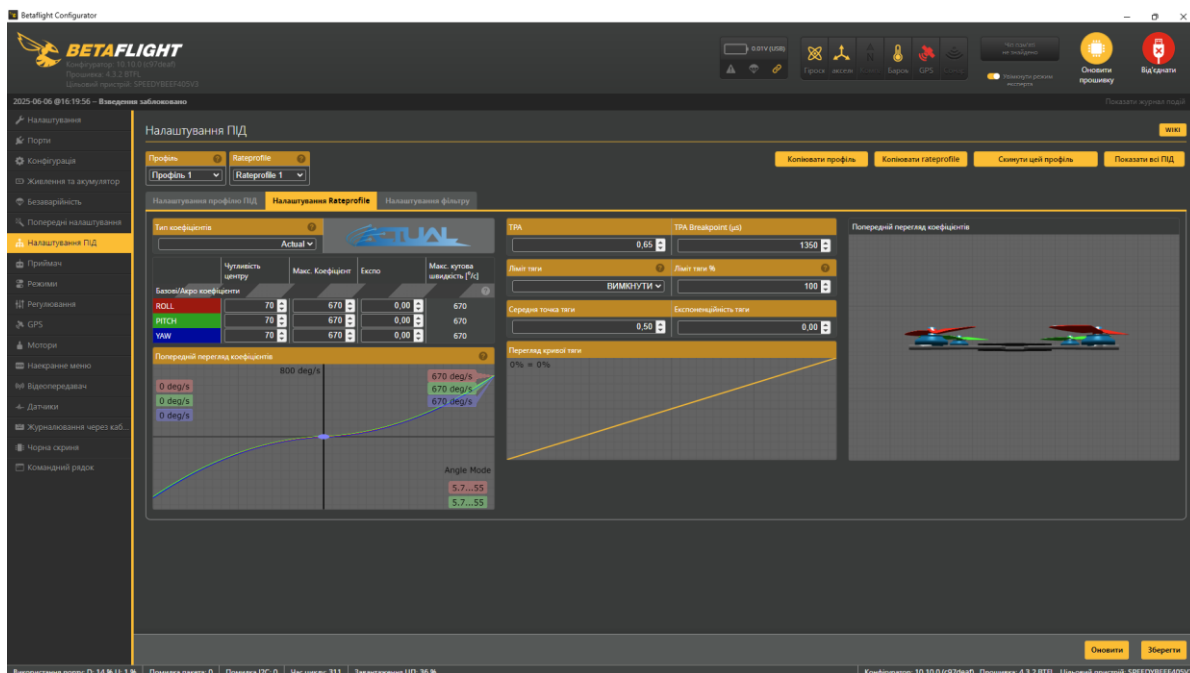


Рис. А.10 – Вкладка «Налаштування ПІД», частина 3

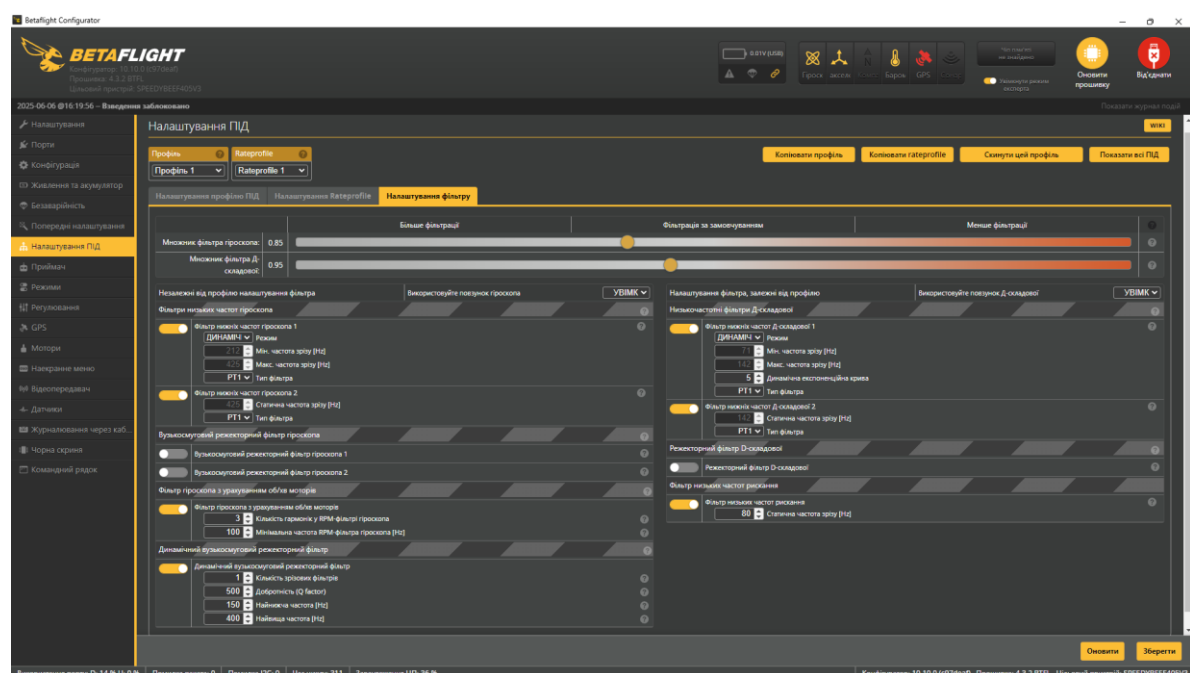


Рис. А.11 – Вкладка «Налаштування ПІД», частина 4

А.7 Вкладка «Приймач»

На цій вкладці налаштовується взаємодія польотного контролера з приймачем радіокерування, включаючи вибір протоколу, схему каналів, налаштування RSSI та мертвих зон стіків.

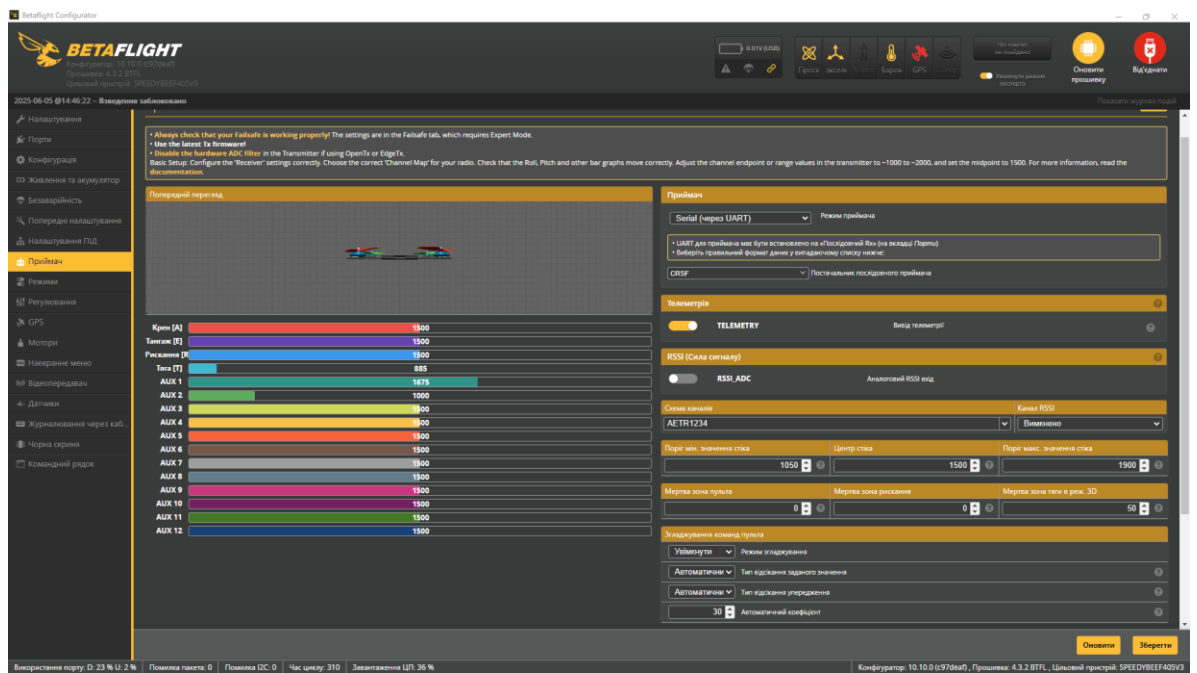


Рис. А.12 – Вкладка «Приймач» у Betaflight Configurator

А.8 Вкладка «Режими»

Вкладка «Режими» дозволяє призначити різні функції та режими польоту на перемикачі апаратури радіокерування.

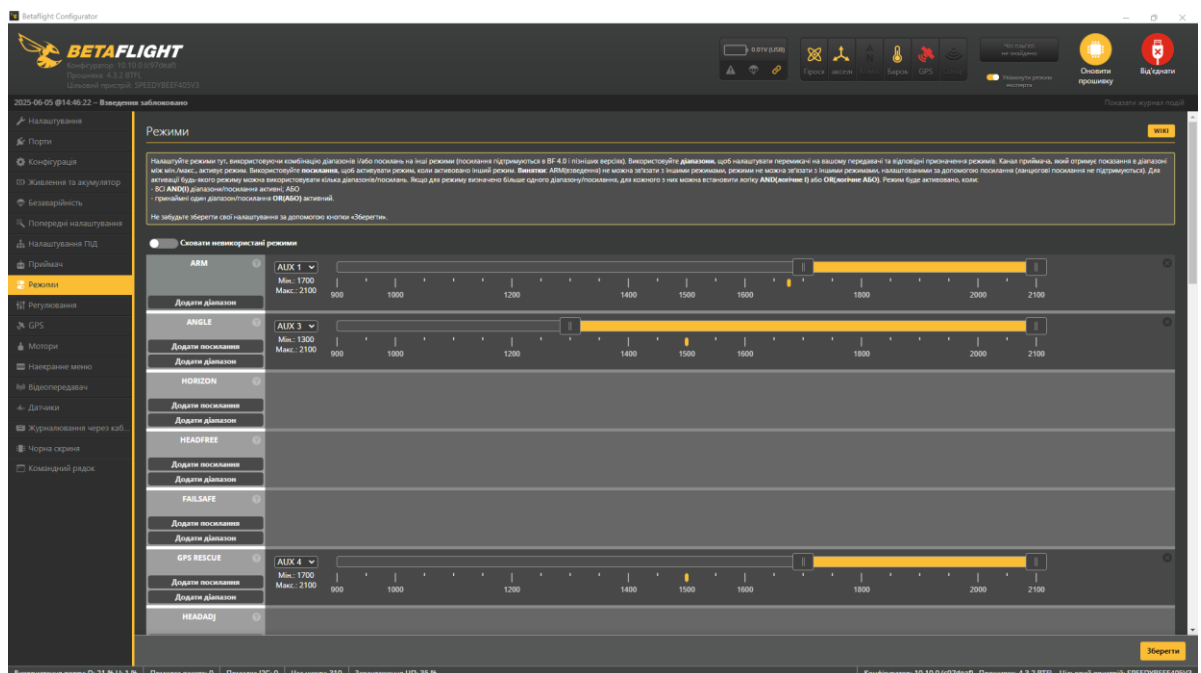


Рис. А.13 – Вкладка «Режими», частина 1

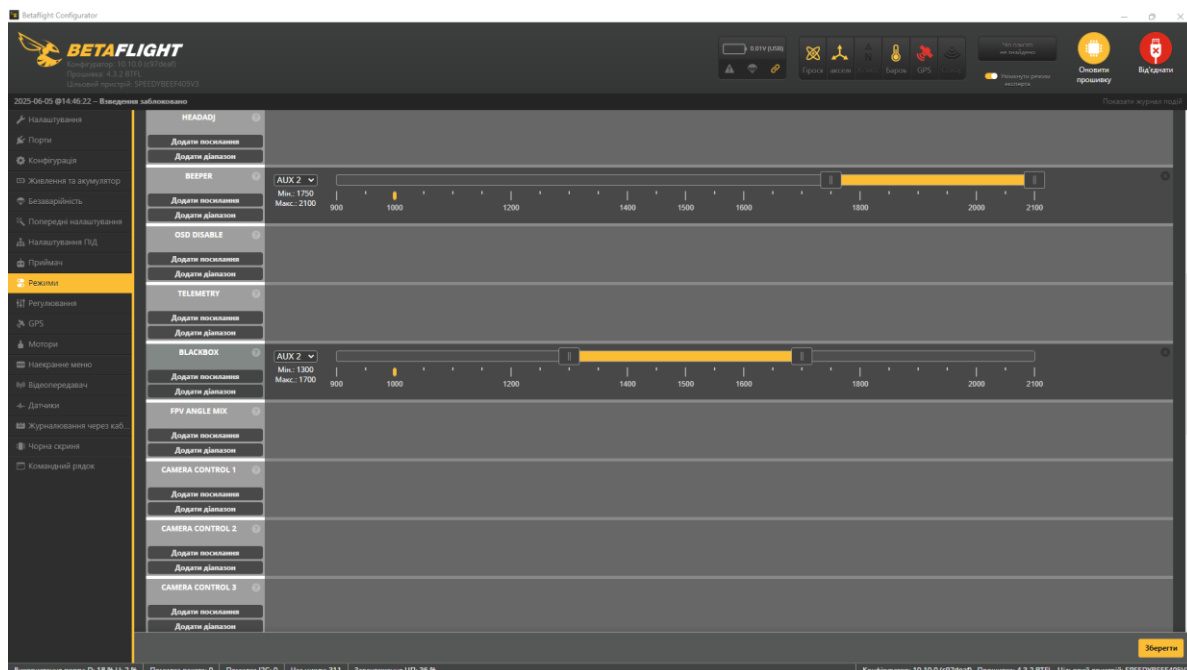


Рис. А.14 – Вкладка «Режими», частина 2

А.9 Вкладка «GPS»

Ця вкладка призначена для конфігурації GPS-модуля та моніторингу його стану.

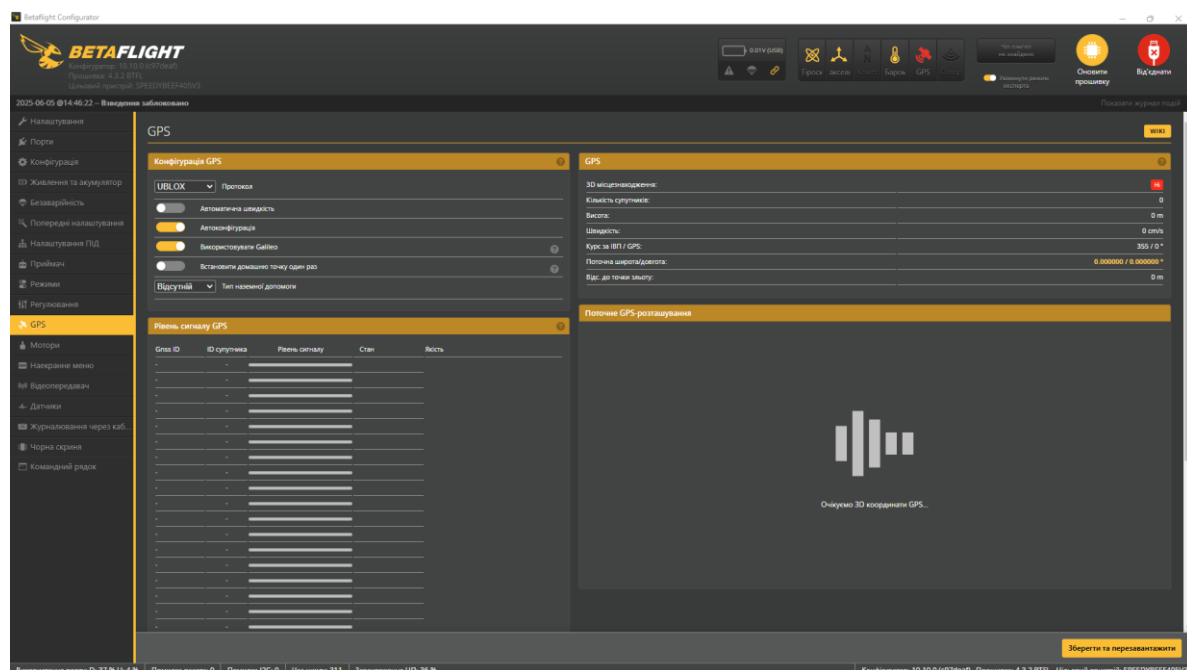


Рис. А.15 – Вкладка «GPS» у Betaflight Configurator

А.10 Вкладка «Мотори»

На цій вкладці здійснюється тестування моторів, налаштування протоколу ESC та напрямку обертання моторів.

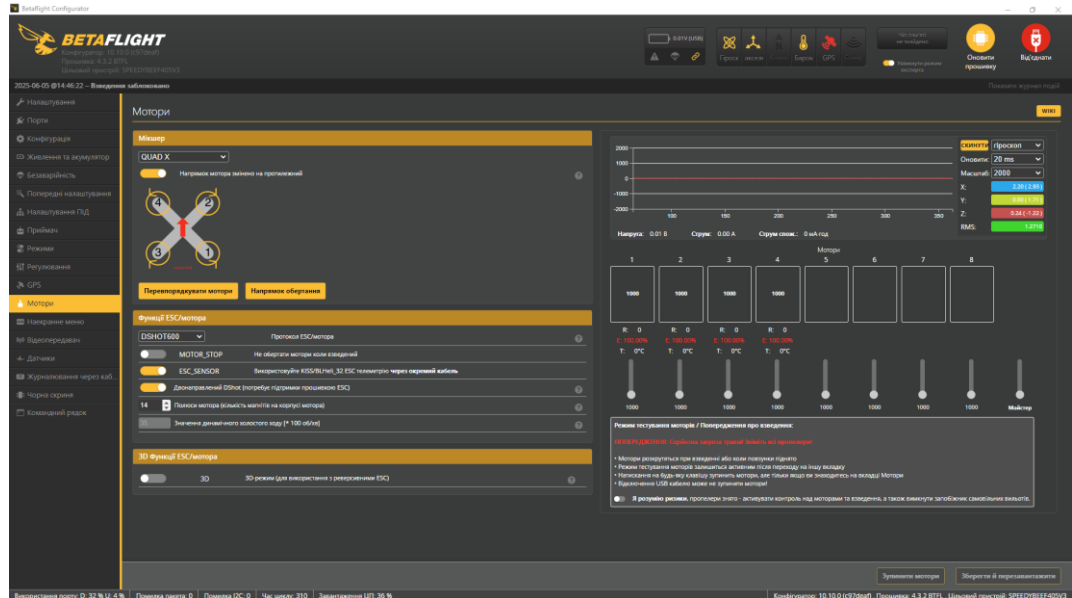


Рис. А.16 – Вкладка «Мотори» у Betaflight Configurator

А.11 Вкладка «Наекранне меню»

Ця вкладка дозволяє налаштувати відображення різної телеметричної інформації на екрані FPV-шолома оператора.

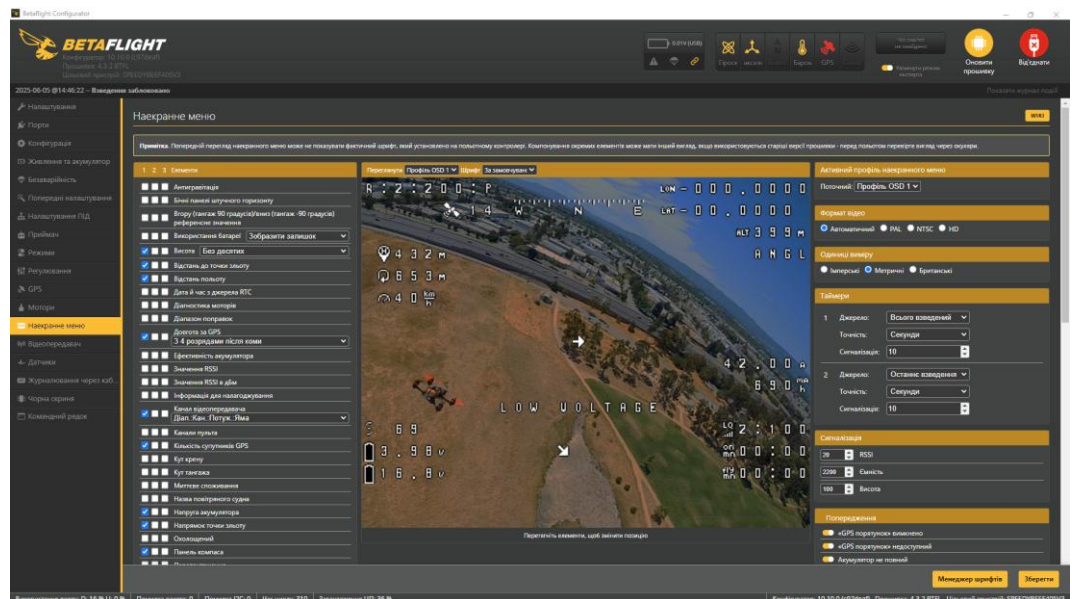


Рис. А.17 – Вкладка «Наекранне меню», частина 1

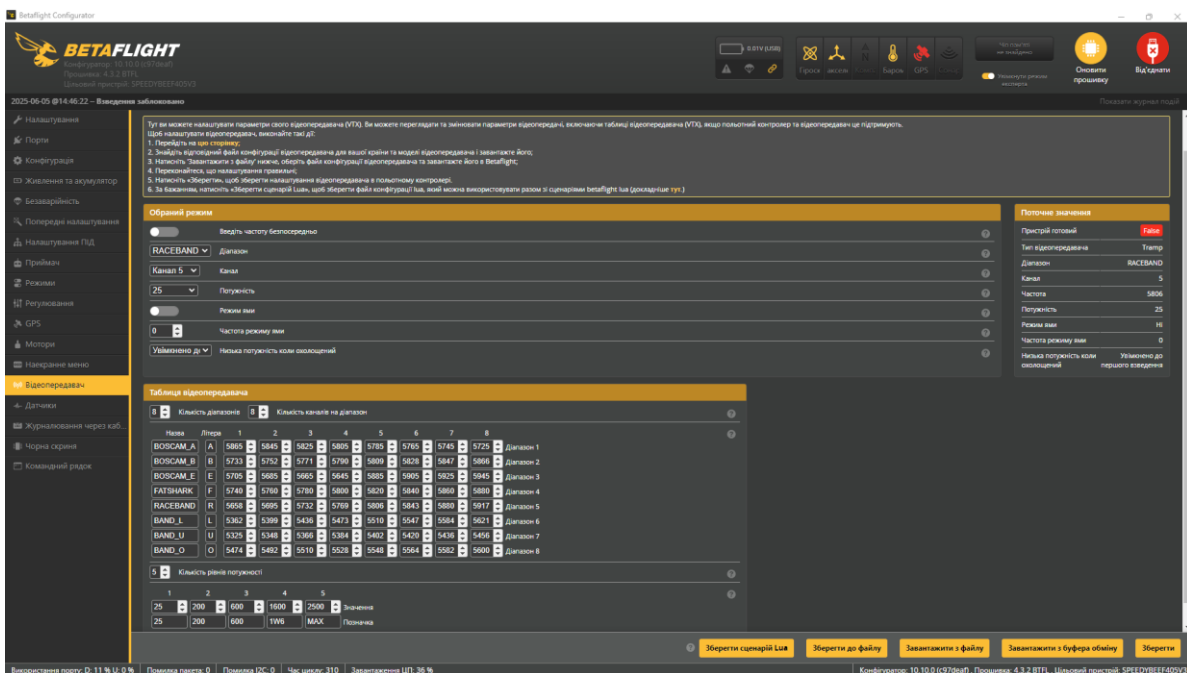


Рис. А.20 – Вкладка «Відеопередавач» у Betaflight Configurator

А.13 Вкладка «Датчики»

На цій вкладці відображаються дані з бортових сенсорів у реальному часі, що корисно для діагностики їхньої роботи.

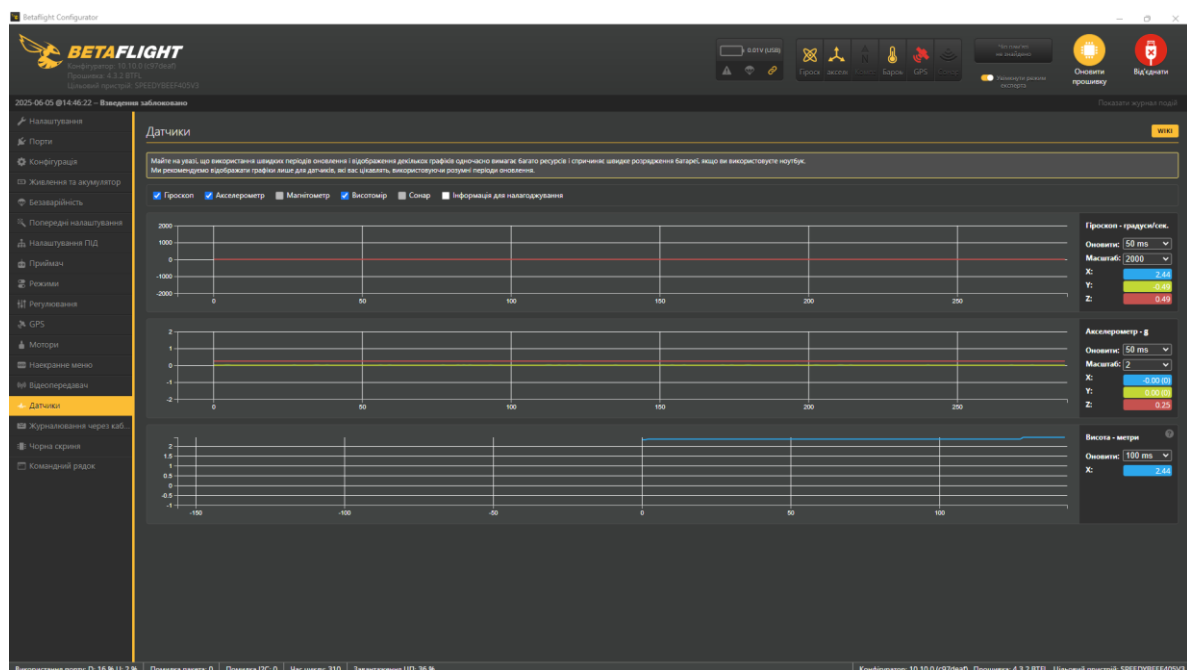


Рис. А.21 – Вкладка «Датчики» у Betaflight Configurator

А.14 Вкладка «Журналювання через кабель»

Ця вкладка може використовуватися для налаштування передачі телеметричних даних або для журналювання даних через кабель.

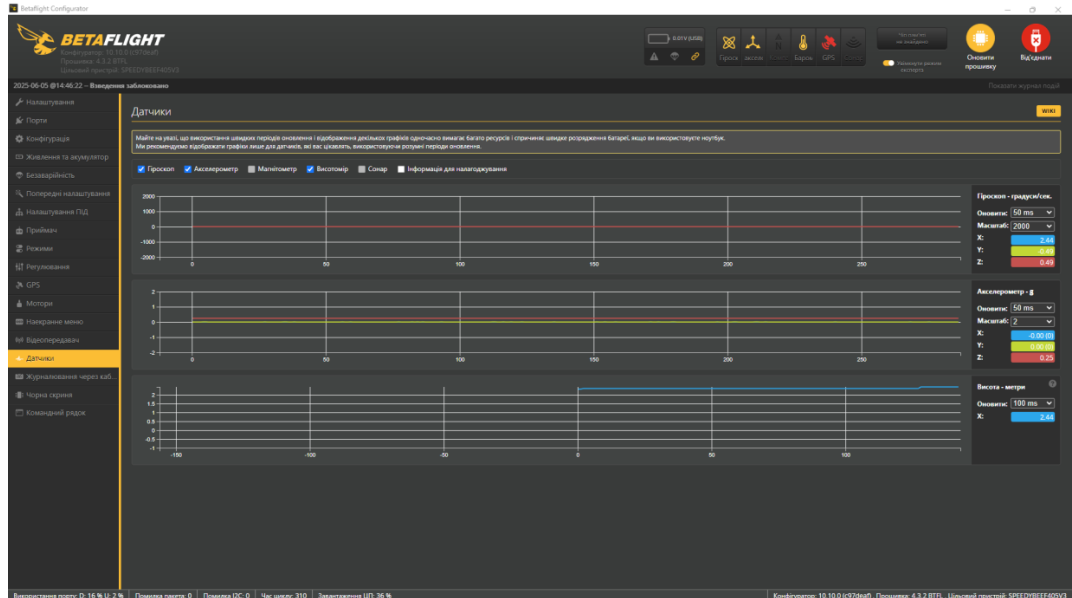


Рис. А.22 – Вкладка «Журналювання через кабель»

А.15 Вкладка «Чорна скриня»

Налаштування запису польотних даних («чорної скрині») на вбудовану SD-карту або зовнішній логер.

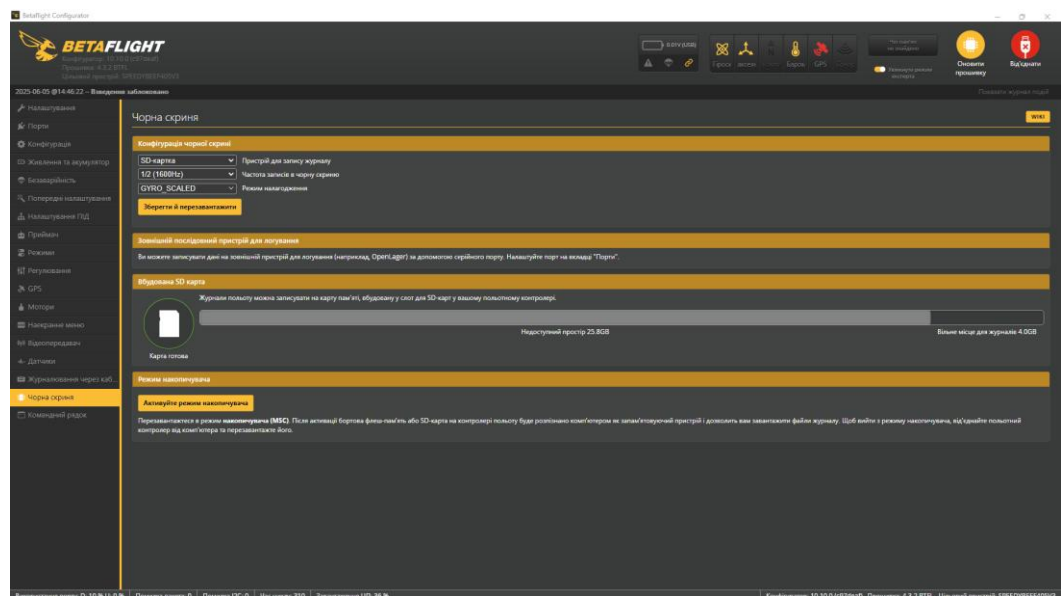


Рис. А.23 – Вкладка «Чорна скриня» у Betaflight Configurator

А.16 Вкладка «Командний рядок»

Інтерфейс командного рядка (CLI) надає доступ до всіх налаштувань польотного контролера у текстовому вигляді та дозволяє виконувати розширені команди.

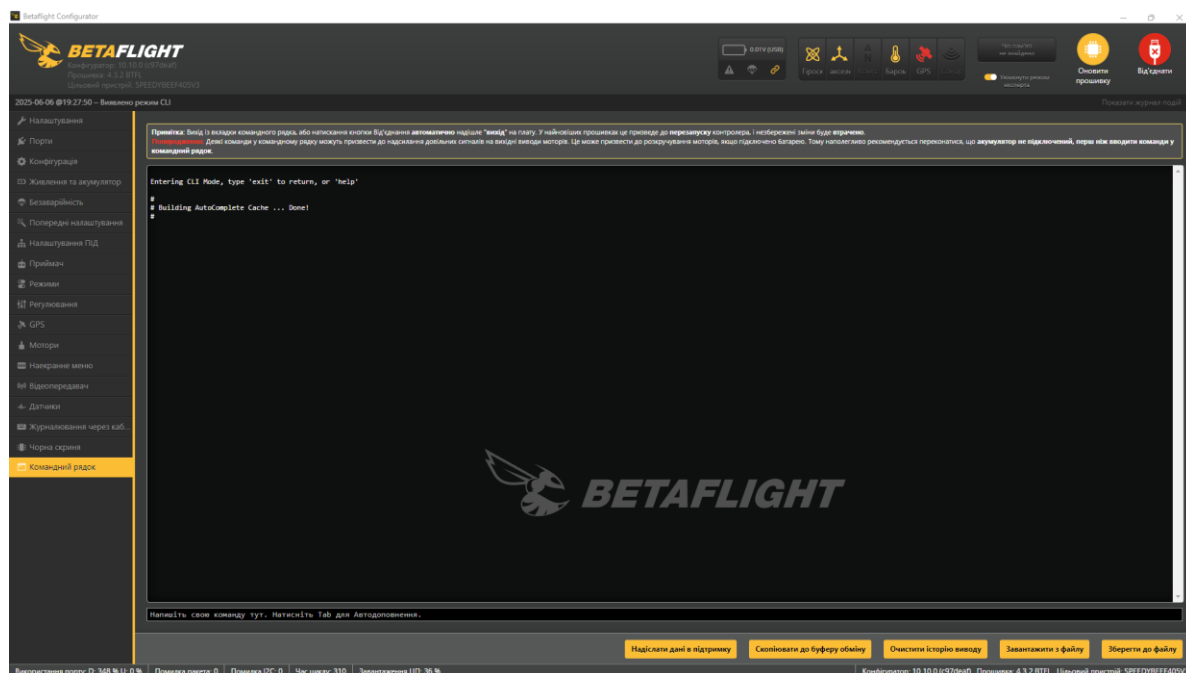


Рис. А.24 – Вкладка «Командний рядок» у Betaflight Configurator

ДОДАТОК Б

Бекап налаштувань дрона

```
defaults nosave
# version
# Betaflight / SPEEDYBEEF405V3 (SBF4) 4.3.2 Apr 7 2023 /
03:15:27 (f156481e9) MSP API: 1.44
# start the command batch
batch start
# reset configuration to default settings
defaults nosave
board_name SPEEDYBEEF405V3
mcu_id 002400463433510f35363338
signature
# feature
feature GPS
feature ESC_SENSOR
# serial
serial 0 8192 115200 57600 0 115200
serial 5 2 115200 57600 0 115200
# aux
aux 0 0 0 1700 2100 0 0
aux 1 1 2 1300 2100 0 0
aux 2 46 3 1700 2100 0 0
aux 3 13 1 1750 2100 0 0
aux 4 26 1 1300 1700 0 0
# vtxtable
vtxtable bands 8
vtxtable channels 8
vtxtable band 1 BOSCAM_A A CUSTOM 5865 5845 5825 5805 5785
5765 5745 5725
vtxtable band 2 BOSCAM_B B CUSTOM 5733 5752 5771 5790 5809
5828 5847 5866
vtxtable band 3 BOSCAM_E E CUSTOM 5705 5685 5665 5645 5885
5905 5925 5945
vtxtable band 4 FATSHARK F CUSTOM 5740 5760 5780 5800 5820
5840 5860 5880
vtxtable band 5 RACEBAND R CUSTOM 5658 5695 5732 5769 5806
5843 5880 5917
vtxtable band 6 BAND_L L CUSTOM 5362 5399 5436 5473 5510
5547 5584 5621
vtxtable band 7 BAND_U U CUSTOM 5325 5348 5366 5384 5402
5420 5436 5456
vtxtable band 8 BAND_O O CUSTOM 5474 5492 5510 5528 5548
5564 5582 5600
vtxtable powerlevels 5
vtxtable powervalues 25 200 600 1600 2500
vtxtable powerlabels 25 200 600 1W6 MAX
# rxfail
rxfail 5 s 1000
# master
```

```

set gyro_lpf1_static_hz = 212
set gyro_lpf2_static_hz = 425
set dyn_notch_count = 1
set dyn_notch_q = 500
set dyn_notch_max_hz = 400
set gyro_lpf1_dyn_min_hz = 212
set gyro_lpf1_dyn_max_hz = 425
set acc_calibration = -34,-24,18,1
set serialrx_provider = CRSF
set blackbox_sample_rate = 1/2
set dshot_bidir = ON
set failsafe_procedure = GPS-RESCUE
set bat_capacity = 4000
set yaw_motors_reversed = ON
set small_angle = 180
set gps_provider = UBX
set gps_ublox_use_galileo = ON
set gps_rescue_descent_dist = 30
set gps_rescue_min_sats = 6
set gps_rescue_allow_arming_without_fix = ON
set deadband = 2
set yaw_deadband = 2
set simplified_gyro_filter_multiplier = 85
set osd_warn_link_quality = ON
set osd_vbat_pos = 2464
set osd_link_quality_pos = 2424
set osd_tim_1_pos = 2456
set osd_tim_2_pos = 2488
set osd_flymode_pos = 2170
set osd_throttle_pos = 2400
set osd_vtx_channel_pos = 2048
set osd_current_pos = 2327
set osd_mah_drawn_pos = 2361
set osd_gps_speed_pos = 2209
set osd_gps_lon_pos = 18452
set osd_gps_lat_pos = 18484
set osd_gps_sats_pos = 2085
set osd_home_dir_pos = 2445
set osd_home_dist_pos = 2145
set osd_flight_dist_pos = 2177
set osd_compass_bar_pos = 2090
set osd_altitude_pos = 18521
set osd_avg_cell_voltage_pos = 2432
set osd_flip_arrow_pos = 2286
set debug_mode = GYRO_SCALED
set vtx_band = 5
set vtx_channel = 5
set vtx_power = 1
set vtx_low_power_disarm = UNTIL_FIRST_ARM
set vtx_freq = 5806
profile 0
# profile 0
set dterm_lpf1_dyn_min_hz = 71

```

```

set dterm_lpf1_dyn_max_hz = 142
set dterm_lpf1_static_hz = 71
set dterm_lpf2_static_hz = 142
set iterm_rotation = ON
set yaw_lowpass_hz = 80
set p_pitch = 57
set i_pitch = 39
set f_pitch = 95
set p_roll = 58
set i_roll = 38
set f_roll = 95
set p_yaw = 49
set i_yaw = 36
set f_yaw = 95
set d_min_roll = 22
set d_min_pitch = 46
set d_max_gain = 0
set d_max_advance = 0
set motor_output_limit = 90
set auto_profile_cell_count = 6
set thrust_linear = 20
set dyn_idle_min_rpm = 35
set simplified_pids_mode = OFF
set simplified_dterm_filter_multiplier = 95
profile 1
profile 2
# restore original profile selection
profile 0
rateprofile 0
rateprofile 1
rateprofile 2
rateprofile 3
rateprofile 4
rateprofile 5
# restore original rateprofile selection
rateprofile 0
# save configuration

```