

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
Розробка математичної моделі для комп'ютеризованого керування
параметрами FPV дрона
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи КТРСм-23-2
Макушев І. А.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерні та
робототехнічні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Сотник С.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

Невлюдов І.ІІІ.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет АКТ
Кафедра КІТАР
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Комп'ютерні та робототехнічні системи
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Макушеву Іллі Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка математичної моделі для комп'ютеризованного керування параметрами FPV дрона

Затверджена наказом по університету від 25.11.2024 №1239 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16.01.2025 р

3. Вихідні дані до роботи:

3.1 Процесор AMD Ryzen 5 3600

3.2 Оперативна пам'ять 16 Гб

3.3 Операційна система Windows 10 Pro

3.4 Середовище розробки Autodesk Tinkercad

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ

4.2 Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку FPV-дронів

4.3 Огляд основних параметрів та характеристик FPV дронів

4.4 Розробка системи керування параметрами FPV дрона

4.5 Розробка математичної моделі для комп'ютеризованого керування параметрами FPV

4.6 Охорона праці

4.7 Висновки та перелік джерел посилань

5. Перелік графічного матеріалу із зазначення блок-схем комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 13 стор. Формату А4


6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Приміт-ка
1	Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку FPV дронів	27.11.24	Виконано
2	Огляд основних параметрів та характеристик FPV дронів	27.11.24 – 01.12.24	Виконано
3	Моделювання конструкції FPV дрона	02.12.24 – 04.12.24	Виконано
4	Визначення параметрів FPV дрону, що підлягають комп'ютеризованому управлінню	06.12.24 – 08.12.24	Виконано
5	Розробка математичної моделі для комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрона	14.12.24 – 16.12.24	Виконано
6	Дослідження параметрів керування FPV дроном	17.12.24 – 25.12.24	Виконано
7	Охорона праці	26.12.24 – 28.12.24	Виконано
8	Висновки та перелік джерел посилань	29.12.24 – 05.01.25	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки	16.01.25	Виконано

Дата видачі завдання 25 листопада 2024 р.

Здобувач  Макушев І.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ доц. Сотник С. В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозовлену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«13» січня 2025 р.



Макушев І.А.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить: 73 с., 4 табл., 20 рис., 3 дод., 23 джерело.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, FPV ДРОН, PID-РЕГУЛЯТОР, ПОЛІТНИЙ КОНТРОЛЕР, СИМУЛЯЦІЯ ПОЛЬОТУ, PUTHON.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення ефективності комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрона за рахунок розроблення математичної моделі, шляхом симуляції роботи FPV дрона.

Об'єкт дослідження – системи управління польотними параметрами FPV дронів.

Предмет дослідження – математична модель та алгоритми управління польотними параметрами FPV дрону.

У кваліфікаційній роботі: проаналізовано сучасний стан та тенденцій розвитку FPV дронів; визначено основні параметри та характеристики FPV дронів; проаналізувано структуру системи керування FPV дроном; розробленоструктуру FPV дрону; визначено параметри FPV дрону, що підлягають комп'ютеризованому управлінню; розроблено математичну модель для комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрона; проведено дослідження параметрів математичної моделі.

Результати роботи відповідають Цілям сталого розвитку 9 та 12: «Промисловість, інновації та інфраструктура», «Відповідальне споживання та виробництво».

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та налаштуванні FPV дронів для оптимізації їх льотних характеристик та підвищення стабільності польоту. Розроблені моделі та програмне забезпечення можуть застосовуватись у навчальному процесі під час підготовки фахівців зі спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Основні результати дослідження опубліковані у науковій статті.

ABSTRACT

The qualification work contains: 73 p., 4 tables, 20 figures, 3 appendices, 23 sources.

MATHEMATICAL MODELING, FPV DRONE, PID-REGULATOR, FLIGHT CONTROLLER, FLIGHT SIMULATION, PYTHON.

The goal of the qualification work is to increase the efficiency of computerized control of FPV drone parameters by developing a mathematical model by simulating the operation of an FPV drone.

The object of the study is the control systems for the flight parameters of FPV drones.

The subject of the study is the mathematical model and algorithms for controlling the flight parameters of FPV drones.

In the qualification work: the current state and trends in the development of FPV drones are analyzed; the main parameters and characteristics of FPV drones have been determined; the structure of the drone FPV control system was analyzed; developed FPV drone structure; the parameters of the drone's FPV subject to computerized control are defined; a mathematical model for computerized control of FPV drone parameters was developed; The study of the parameters of the mathematical model was carried out.

The results of the work correspond to Sustainable Development Goals 9 and 12: "Industry, Innovation and Infrastructure", "Responsible Consumption and Production".

The results obtained can be used in the design and tuning of FPV drones to optimize their flight characteristics and increase flight stability. The developed models and software can be used in the educational process during the training of specialists in the specialty 174 Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics.

The main results of the research are published in a scientific article.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ.....	9
1 Аналіз предметної області	11
1.1 Концепція FPV та її застосування	11
1.2 Огляд основних параметрів та характеристик FPV дронів	18
1.3 Аналіз структури системи керування FPV дроном	21
1.4 Висновки до розділу 1	25
2 Розробка системи керування FPV-дроном	27
2.1 Вибір програмного забезпечення для моделювання конструкції FPV дрона	28
2.2 Розроблення структури FPV дрона	33
2.2.1 Вибір основних компонентів FPV дрона	34
2.2.2 Проектування розташування компонентів FPV дрона	39
2.2.3 Створення корпусу FPV дрона	43
2.3 Моделювання конструкції FPV дрона	46
2.4 Синтез двоконтурної системи управління мотором FPV дрона	50
2.5 Висновки до розділу 2	52
3 Розробка математичної моделі для комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрона	53
3.1 Визначення параметрів FPV дрону, що підлягають комп'ютеризованому управлінню	53
3.2 Розробка математичної моделі для комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрону	63
3.3 Дослідження параметрів управління FPV дроном	66
3.4 Охорона праці.....	69
3.5 Висновки до розділу 3	71
Висновки	72

	8
Перелік джерел посилань	74
Додаток А Висвітлення результатів у публікаціях.....	78
Додаток Б Код реалізації основного скетчу на Arduino UNO	81
Додаток Б Демонстраційний матеріал у вигляді презентації	86

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІН

- FPV (First Person View) – вид від першої особи;
- ESC (Electronic Speed Controller) – електронний регулятор швидкості;
- IMU (Inertial Measurement Unit) – інерційний вимірювальний модуль;
- GPS (Global Positioning System) – глобальна система позиціонування;
- PWM (Pulse Width Modulation) – широтно-імпульсна модуляція;
- FC (Flight Controller) – польотний контролер;
- BEC (Battery Elimination Circuit) – схема вимкнення батареї;
- LiPo (Lithium Polymer) – літій-полімерний акумулятор;
- RPM (Revolutions Per Minute) – обороти за хвилину;
- RC (Radio Control) – радіокерування;
- OSD (On-Screen Display) – екранне меню;
- VTX (Video Transmitter) – відеопередавач;
- API (Application Programming Interface) – інтерфейс програмування програм;
- GUI (Graphical User Interface) – графічний інтерфейс користувача.

ВСТУП

Актуальність розробки математичних моделей для комп'ютеризованого управління FPV дронами стрімко зростає з розвитком безпілотних технологій та їх широким впровадженням у різні сфери діяльності. FPV (First Person View) дрони, що забезпечують передачу відео в реальному часі з борту апарата, вимагають особливо точного керування для виконання складних маневрів та забезпечення стабільної відеозйомки.

Сучасні FPV дрони використовуються у спортивних змаганнях, кінематографії, промисловій інспекції та інших галузях, де потрібна висока маневреність та точність управління. Математичне моделювання параметрів керування дозволяє оптимізувати польотні характеристики, підвищити стабільність польоту та ефективність виконання поставлених завдань.

Комп'ютеризоване керування на основі математичних моделей дозволяє враховувати численні фактори, що впливають на політ дрону: аеродинамічні характеристики, вплив вітру, інерційні параметри, особливості роботи двигунів та систем стабілізації. Це дозволяє створювати досконаліші алгоритми управління та автоматичну стабілізацію польоту.

Впровадження точних математичних моделей у системи управління FPV дронами відкриває нові можливості для автоматизації польотів, покращення характеристик стабілізації та спрощення управління для пілотів. Це особливо важливо для професійного використання дронів, де потрібна висока точність виконання маневрів та стабільність польоту.

Мета роботи – розробка математичної моделі для комп'ютеризованого управління параметрами FPV-дрону, що дозволяє забезпечити точний контроль його польотних характеристик для покращення стабільності і маневреності під час польоту.

Об'єкт дослідження – системи управління польотними параметрами FPV дронів.

Предмет дослідження – математична модель та алгоритми управління польотними параметрами FPV дрону.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати сучасний стан та тенденцій розвитку FPV дронів;
- визначення основних параметрів та характеристик FPV дронів;
- проаналізувати структуру системи керування FPV дроном;
- розробити структуру FPV дрону;
- визначити параметри FPV дрону, що підлягають комп'ютеризованому управлінню;
- розробити математичну модель для комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрона;
- виконати експериментальну частину;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка [2].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Концепція FPV та її застосування

FPV (First-Person View) – це технологія, що дозволяє оператору керувати дроном або іншим апаратом, спостерігаючи за оточенням в реальному часі з точки зору самого дрона. Оператор використовує спеціальні окуляри або екран для отримання відеопотоку від камери, встановленої на дроні, що створює ефект присутності на борту [3]. Це значно підвищує точність і контроль під час польотів, дозволяючи швидко реагувати на зміни в оточенні.

FPV-дрони роблять значний внесок у розвиток багатьох сфер завдяки їх точності, гнучкості і швидкості. Вони є незамінним інструментом у сучасних технологіях: від розваг до промислових застосувань [4]. Їх вплив помітний як у повсякденному житті, так і в критичних ситуаціях, що свідчить про їхнє зростаюче значення в сучасному технологічному прогресі.

FPV-дрони мають широкий спектр застосувань:

– спортивні змагання – гонки дронів стали популярним видом спорту, де FPV-дрони змагаються на швидкість та маневреність. Завдяки швидкому відгуку відеозображення пілоти можуть здійснювати складні маневри на високих швидкостях рисунок 1.1;



Рисунок 1.1 – Спортивні змагання FPV дрони

– аерофотозйомка та відео зйомка – FPV-дрони використовуються в кінематографі та фотографії для створення динамічних кадрів, які важко або неможливо отримати за допомогою традиційних методів зйомки рисунок 1.2;



Рисунок 1.2 – Аерофотозйомка та відео зйомка FPV дронів

– промислове обслуговування та інспекція – FPV-дрони активно застосовуються для обстеження важкодоступних об'єктів, таких як мости, вітряні турбіни, нафтові платформи тощо, рисунок 1.3;



Рисунок 1.3 – Промислове обслуговування FPV дронів

– рятувальні операції – В умовах аварій або катастроф FPV-дрони можуть використовуватися для пошуку людей, оцінки ситуацій або доставки невеликих вантажів рисунок 1.4.



Рисунок 1.4 – Рятувальні операції FPV дронів

Далі розглянемо конструкцію FPV-дронів, вони мають специфічну конструкцію, що включає такі основні компоненти:

– камера FPV – невелика камера, яка передає відео в реальному часі на окуляри або екран оператора. Камери мають високу частоту кадрів і низьку

затримку для забезпечення миттєвої реакції на зміну умов польоту, рисунок 1.5;



Рисунок 1.5 – Камера FPV

– передавач відео (VTX) – система передачі відеосигналу від дрона на окуляри або екран пілота через бездротові канали (часто на частоті 5,8 ГГц), рисунок 1.6;



Рисунок 1.6 – Передавач відео (VTX)

– окуляри FPV або монітори – пристрої для перегляду відеопотоку, які створюють відчуття, що пілот знаходиться на борту дрона, рисунок 1.7;



Рисунок 1.7 – Окуляри FPV

– мотори та пропелери – система, що відповідає за рух і маневреність дрона. Моторна установка зазвичай розрахована на швидку реакцію та високу маневреність, рисунок 1.8-1.9;



Рисунок 1.8 – Мотори FPV



Рисунок 1.9 – Пропелери FPV

– контролер польоту – центральний комп'ютер дрона, який обробляє команди оператора і дані з датчиків, таких як гіроскопи та акселерометри, рисунок 1.10;

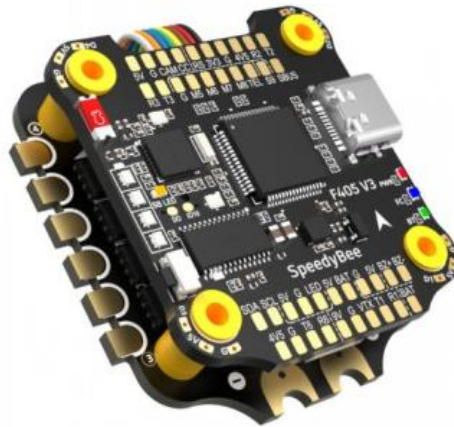


Рисунок 1.10 – Контролер польоту FPV

Існує ціла множина переваг FPV:

– реалістичність управління – FPV-дрони надають користувачам змогу відчувати себе «на борту», що підвищує точність керування, особливо при виконанні складних маневрів або польотів на великій швидкості [5];

- миттєвий зворотній зв'язок – FPV-технологія забезпечує низьку затримку в передачі відеосигналу, що є важливим для високошвидкісних польотів або точного маневрування;

- гнучкість застосування – FPV-дрони можуть використовуватися у важкодоступних місцях, де інші засоби стають непридатними.

Найчастіші сфери застосування FPV-дронів:

- спорт і розваги – гонки дронів популярний вид змагань, що вимагає від пілотів швидкої реакції та точності. FPV надає операторам можливість контролювати дрони на максимальних швидкостях із безпрецедентною точністю;

- професійне використання – у кінематографі FPV-дрони створюють унікальні ракурси та рухомі кадри. В індустріальних сферах – допомагають у діагностиці та обстеженні об'єктів, до яких важко дістатися [6];

- рятувальні місії – під час надзвичайних ситуацій FPV-дрони використовуються для моніторингу зон катастроф, пошуку постраждалих або доставки медикаментів.

У даному розділі було детально розглянуто концепцію FPV-дронів та їх практичне застосування. Було визначено, що FPV (First-Person View) – це ключова технологія, яка забезпечує оператору можливість керувати дроном через пряму відеотрансляцію з борту апарату в реальному часі. Було проаналізовано основні компоненти FPV-дронів, включаючи камеру, відеопередавач, окуляри FPV, мотори, пропелери та контролер польоту, що разом забезпечують ефективну роботу системи. Особлива увага була приділена різноманітним сферам застосування FPV-дронів – від спортивних змагань і розваг до професійної аерофотозйомки та рятувальних операцій. Також були визначені ключові переваги FPV-технології, такі як реалістичність управління, миттєвий зворотній зв'язок та гнучкість застосування, що роблять цю технологію особливо цінною у сучасному світі.

1.2 Огляд основних параметрів та характеристик FPV дронів

FPV (First-Person View) дрони – це безпілотні літальні апарати, які забезпечують передачу відеосигналу від камери на борту дрону до пілота в режимі реального часу. FPV дрони широко використовуються для зйомок, перегонів, а також для технічних та комерційних задач, таких як інспекція об'єктів, рятувальні операції та сільськогосподарські потреби. Основні параметри FPV дронів визначають їх продуктивність, маневреність та здатність виконувати різні задачі. Далі розглянемо ключові характеристики FPV дронів:

- рама дрону є його конструкційною основою, до якої прикріплюються всі компоненти. Вона визначає загальну міцність і жорсткість апарату. Основні характеристики рами: матеріал – карбон, алюміній, пластик. Найбільш поширені рами з карбону завдяки легкості та міцності; розмір – зазвичай визначається відстанню між осями двигунів (у міліметрах). Стандартні розміри коливаються від 150 мм для маленьких дронів до 300 мм і більше для більших моделей. Тип рами – "X" або "H" конфігурації, які впливають на розподіл ваги та аеродинаміку;

- двигуни FPV дронів визначають їх потужність, швидкість та маневреність. Основні характеристики двигунів: тип двигуна – бесколекторні двигуни використовуються в сучасних FPV дронах завдяки високій ефективності та надійності; Kv-значення – визначає оберти двигуна на вольт (RPM/V). Вищі значення дають більшу швидкість, але меншу тягу, і навпаки. Розмір двигуна – позначається двома числами (наприклад, 2207), де перші дві цифри – це діаметр статора, а останні – висота статора у міліметрах. Більші двигуни забезпечують більше тяги;

- пропелери впливають на стабільність, маневреність та швидкість дрону. Важливі параметри: діаметр – більші пропелери дають більше тяги, але знижують маневреність; крок лопатей – визначає, наскільки глибоко пропелер може "захопити" повітря за один оберт. Вищий крок збільшує тягу,

але потребує більше енергії; матеріал – пластикові пропелери легкі та дешеві, а карбонові міцніші та більш стійкі до пошкоджень;

– контролер польоту є "мозком" дрону, який відповідає за управління і стабілізацію польоту. Основні характеристики: процесор – більшість сучасних контролерів оснащені 32-бітними процесорами для швидкої обробки даних і забезпечення стабільного польоту; гіроскопи та акселерометри – сенсори, які допомагають контролеру визначати орієнтацію та положення дрону в просторі; підтримка прошивки – популярні прошивки (Betaflight, iNav, Cleanflight) дозволяють оптимізувати налаштування дрону під різні потреби;

– система FPV забезпечує передачу відеосигналу пілоту для керування в реальному часі. Основні компоненти: FPV-камера – камери з низькою затримкою і широким кутом огляду дозволяють краще оцінювати обстановку під час польоту. Важливі параметри роздільна здатність (720 p, 1080 p) та формат відео (PAL/NTSC). Відеопередавач (VTX) – потужність передавача визначає дальність передачі відеосигналу. Типові потужності від 25 мВт до 800 мВт. FPV-окуляри або монітор – пристрої для перегляду відео. Окуляри забезпечують занурення у процес польоту, тоді як монітори зручніші для спостерігачів;

– акумулятори є джерелом живлення для дрону і впливають на тривалість польоту. Основні характеристики: напруга (V) – визначається кількістю елементів (банок) у акумуляторі. Найпоширеніші 3S (11,1 V), 4S (14,8 V), 6S (22,2 V); ємність (mAh) – визначає скільки енергії може зберігати акумулятор. Більша ємність забезпечує довший час польоту; розрядний струм (C-значення) – визначає з якою швидкістю акумулятор може віддавати енергію. Чим вище значення, тим більше потужності може забезпечити акумулятор;

– радіоуправління забезпечує зв'язок між пілотом і дроном. Основні параметри системи: частота зв'язку – найпоширеніші частоти 2,4 ГГц і 5,8 ГГц. 2,4 ГГц забезпечує більший радіус дії, тоді як 5,8 ГГц використовується

для відео; дальність – дальність управління може варіюватися від декількох сотень метрів до кількох кілометрів залежно від потужності передавача та приймача;

- телеметричні системи дозволяють отримувати дані про стан дрону в реальному часі, такі як напруга акумулятора, висота польоту, відстань до пілота тощо. Це покращує безпеку польотів і дає можливість оперативно реагувати на непередбачувані ситуації;

- важливим компонентом FPV дронів є програмне забезпечення, яке забезпечує налаштування параметрів польоту, стабілізації, а також дозволяє пілоту оптимізувати контроль над дроном. Популярні програми, як-от Betaflight, iNav, дозволяють тонко налаштувати дрон під різні умови та задачі.

У цьому розділі були детально проаналізовані основні параметри та характеристики FPV (First-Person View) дронів, які є ключовими для їх ефективного функціонування та виконання різних завдань, завдяки своїй конструкції та технічному оснащенню забезпечують передачу відеосигналу в режимі реального часу, що робить їх незамінними у сфері гонки, аерозйомки, інспекційних робіт, рятувальних операцій та сільськогосподарських задач [7].

Основні компоненти FPV дронів, такі як рама, двигуни, пропелери, контролер польоту, система FPV, акумулятори, радіокерування, телеметричні системи та програмне забезпечення мають чітко визначені характеристики, що впливають на продуктивність, маневреність та стабільність польоту:

Рама забезпечує жорсткість конструкції, а матеріал та розмір визначають баланс між міцністю та вагою; двигуни та пропелери відповідають за потужність, швидкість та стабільність руху дрону; контролер польоту та система FPV дозволяють забезпечити точне керування та реалістичну відеопередачу з мінімальною затримкою; акумулятори визначають час польоту та продуктивність апарату, а системи радіокерування забезпечують надійний зв'язок між пілотом та дроном; програмне

забезпечення є основою для налаштування та оптимізації функціоналу дрону відповідно до завдань.

Таким чином, FPV дрони поєднують сучасні технології та інженерні рішення, що дозволяють досягти високої продуктивності, стабільності та надійності під час польоту. Завдяки своїм можливостям FPV дрони продовжують розширювати сферу застосування та стають важливим інструментом у різних галузях.

У даному розділі було проведено детальний аналіз основних параметрів та характеристик FPV-дронів, що мало важливе значення для розуміння їх технічних можливостей та функціональності. Було розглянуто ключові компоненти, такі як рама, двигуни, пропелери, контролер польоту, система FPV, акумулятори, радіоуправління та телеметричні системи, а також їх специфічні характеристики та вплив на роботу дрону.

1.3 Аналіз структури системи керування FPV дроном

Керування FPV дроном є складною багатокомпонентною системою, яка складається з кількох взаємопов'язаних модулів, що забезпечують стабільність, маневреність і точність польоту. Для успішного керування дроном необхідно враховувати різні аспекти – від механіки руху до алгоритмів стабілізації. В основі керування FPV дроном лежить інтеграція апаратного забезпечення, сенсорів і програмного забезпечення, які спільно забезпечують виконання польотних команд і реакцію на зміну умов навколишнього середовища. Структуру FPV дрону можна розглянути на рисунку 1.11.

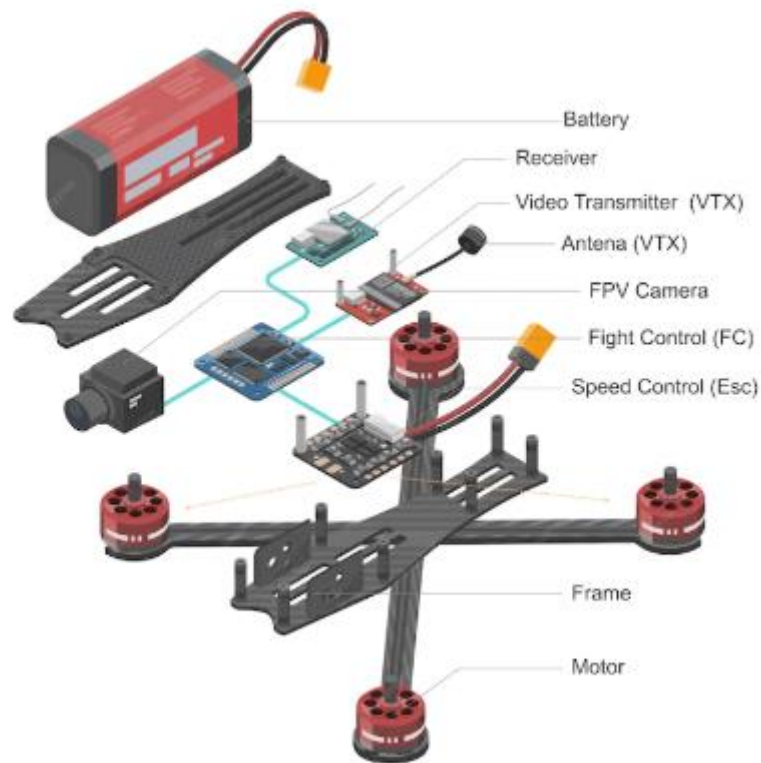


Рисунок 1.11 – Структура FPV дрону

Структура керування FPV дроном включає кілька основних блоків:

- контролер польоту (FC) – центральний модуль керування, який приймає команди від пілота через радіосигнал, обробляє інформацію від сенсорів (акселерометрів, гіроскопів) і регулює роботу двигунів для стабілізації і маневрування дрону;
- радіосистема керування (RC) – система передачі команд пілота на дрон. Включає в себе пульт управління, приймач на борту дрону і канал зв'язку (найчастіше 2,4 ГГц або 5,8 ГГц);
- електронний регулятор швидкості (ESC) – модуль, який керує швидкістю обертання двигунів на основі команд від контролера польоту. ESC перетворює сигнали контролера в імпульси для двигунів [8];
- двигуни – виконавчі механізми, які перетворюють електричну енергію на механічний рух пропелерів, забезпечуючи підйомну силу, тягу і маневреність дрону;

- пропелери – лопаті, які створюють підйомну силу, використовуючи потік повітря, і відповідають за зміну висоти, напрямку та швидкості дрону;
- FPV-камера та відеопередавач (VTX) забезпечують пілоту відео з борту дрону в режимі реального часу, що дає можливість візуально керувати дроном.

Основою керування FPV дроном є алгоритми стабілізації, які контролюють положення і орієнтацію дрону в просторі. Контролер польоту використовує такі алгоритми для стабільного польоту:

- алгоритми стабілізації – основна задача полягає в підтриманні дрону в рівновазі під час польоту. Для цього використовуються дані від гіроскопа та акселерометра, які обробляються в режимі реального часу. Контролер польоту компенсує зміщення дрону відносно осей "Roll", "Pitch" та "Yaw", здійснюючи автоматичні коригування за допомогою двигунів;

- алгоритми автономного керування – для більш просунутих моделей FPV дронів можуть застосовуватися алгоритми автоматичного керування, такі як стабілізація висоти, утримання позиції (Position Hold), повернення до точки зльоту (Return to Home), а також маршрутизація по заздалегідь запрограмованим точкам (Waypoint Navigation) [9];

- режими польоту – більшість FPV дронів підтримують кілька режимів керування, які відповідають за рівень автоматизації польоту;

- ручний режим (Acro Mode) – повне керування пілотом без автоматичної стабілізації. Використовується у перегонах або для виконання трюків;

- стабілізований режим (Stabilized Mode) – дрон автоматично вирівнюється по горизонталі після відпускання керування, що спрощує керування для початківців;

- Horizon Mode – комбінує стабілізацію для невеликих рухів і дозволяє виконувати перевороти та фліпи при великих кутах нахилу.

Для керування FPV дроном широко використовуються відкриті прошивки, які дозволяють налаштовувати параметри дрону та оптимізувати його під конкретні потреби. Найпопулярніші платформи:

- Betaflight – найпоширеніша прошивка для гоночних дронів. Вона пропонує широкий набір налаштувань для тонкої регуляції параметрів польоту, підтримує різні типи сенсорів і двигунів [10];

- iNav – призначена для дронів, що потребують більше автономних функцій, таких як утримання висоти, автономні маршрути та автоматичне повернення додому;

- ArduPilot – більш універсальна платформа, яка може використовуватися для різних безпілотних систем – від дронів до наземних і водних роботів.

Програмне забезпечення дозволяє налаштовувати PID-регулятори, які відповідають за реакцію дрону на зміни положення та команди пілота. Правильне налаштування цих параметрів є критично важливим для стабільного та передбачуваного польоту.

Телеметрія є важливим елементом керування дронами, оскільки дозволяє пілоту отримувати дані про стан системи у реальному часі. Основні дані телеметрії:

- напруга акумулятора – важлива для контролю часу польоту та запобігання раптовому розрядженню;

- сила сигналу (RSSI) – відображає якість зв'язку між дроном і пультом керування;

- координати GPS – використовуються для навігації і забезпечення точного повернення на стартову позицію.

Телеметрія може передаватися як на дисплей пульта управління, так і на зовнішній монітор або FPV-окуляри. Це дозволяє пілоту оперативно реагувати на зміни стану дрону [11].

FPV дрони керуються за допомогою радіопередавачів (пультів управління), які мають кілька каналів для передачі команд. Типові пульти мають такі елементи керування:

- джойстики (стікери) – основні елементи керування, що відповідають за зміну кута нахилу (Roll, Pitch), поворот (Yaw) і тягу (Throttle);
- кнопки або перемикачі – використовуються для перемикання між режимами польоту або активації додаткових функцій, таких як повернення додому або режим фліпів.

Керування FPV дроном має свої виклики, серед яких:

- затримка сигналу – може впливати на час реакції пілота, особливо при використанні FPV-окулярів із відеосигналом, що надходить із затримкою;
- втрата сигналу – при втраті радіозв'язку з дроном можуть виникнути аварійні ситуації. Більшість дронів мають функцію автоматичного повернення додому при втраті сигналу;
- інтерференція – використання дронів у середовищах із високим рівнем радіоінтерференції (наприклад, в міських умовах) може призводити до збоїв у керуванні.

1.4 Висновки до розділу 1

У розділі проведено аналіз структури системи керування FPV дроном, що включає основні компоненти, їхні функції та взаємодію. Розглянуто принципи роботи апаратного та програмного забезпечення, зокрема, контролера польоту, радіосистеми керування, регуляторів швидкості, двигунів і пропелерів, а також алгоритмів стабілізації та режимів польоту. Проаналізовано популярні платформи для налаштування дронів і роль телеметрії в забезпеченні ефективного керування.

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ FPV-ДРОНОМ

2.1 Вибір програмного забезпечення для моделювання конструкції FPV дрона

Вибір відповідного середовища розробки конструкції в 3D моделюванні – важливий етап дипломного проекту [12]. Існує кілька різних середовищ, які можуть бути потенційно використані для цієї мети. Для вивчення та порівняння цих середовищ була створена таблиця, в якій порівнюються їхні характеристики. Кожне середовище оцінюється за кількома критеріями, де найкраща характеристика має значення 1, середня – 2, а найгірша – 3.

Це порівняння допоможе визначити, яке середовище найкраще відповідає вимогам вашого дипломного проекту. Результати порівняння, представлені в таблиці 2.1, допоможуть зробити обґрунтований вибір і зосередитися на середовищі, що найбільше підходить для розробки конструкції в 3D моделюванні [13].

Таблиця 2.1 – Порівняння середовища розробки моделі

Характеристика	Blender	SolidWorks	Autodesk 3ds Max
Доступність програми	1	3	3
Функціонал	1	1	2
Підтримка всіх платформ	1	1	1
Краща в анімації	1	2	2
Можливість проводити випробування	3	1	3

Продовження таблиці 2.1

Характеристика	Blender	SolidWorks	Autodesk 3ds Max
Легкість освоєнні	2	2	2
Підтримка форматів файлів	1	1	1
Легкість освоєнні	2	2	2

Перевага та характеристики наведених систем.

Blender – це потужна та безкоштовна система комп'ютерної графіки та анімації, яка пропонує безліч переваг та характеристик [14]. Ось деякі з них:

- безкоштовність та відкритий вихідний код, Blender доступний безкоштовно для скачування та використання, що робить його доступним для широкої аудиторії. Більше того, він поширюється під ліцензією GNU GPL, що означає, що його вихідний код відкритий для змін та розповсюдження;

- комплексний інструментарій, Blender надає широкий спектр інструментів та функцій для 3D-моделювання, текстурювання, анімації, симуляції, рендерингу та монтажу відео. Він може використовуватися для створення статичних зображень, анімаційних фільмів, візуальних ефектів, ігор та багато іншого;

- багатоплатформність бо Blender доступний для Windows, macOS і Linux, що дозволяє використовувати його на різних операційних системах;

- гнучкість і настроюваність бо Blender пропонує великі можливості для налаштування інтерфейсу користувача, гарячих клавіш і робочого процесу. Це дозволяє адаптувати систему під індивідуальні уподобання та потреби користувача;

- підтримка різних форматів бо Blender підтримує широкий спектр форматів файлів для імпорту та експорту, включаючи формати інших

популярних 3D-пакетів. Це полегшує спільну роботу з іншими програмами та обмін даними;

- потужний рендеринг бо Blender включає в себе вбудований двигун рендерингу Cycles, який забезпечує фотореалістичні результати. Також у Blender є підтримка інших движків рендерингу, таких як Eevee та LuxCoreRender;

- активна спільнота бо Blender має величезну та активну спільноту користувачів, яка надає підтримку, навчальні матеріали, уроки та ресурси. Це робить Blender чудовим вибором для новачків та професіоналів, які шукають підтримку та взаємодію з іншими людьми;

- 3D-моделювання та скульптинг бо Blender надає різні інструменти та техніки для створення 3D-моделей, включаючи полігональне моделювання, NURBS, субдивізіони та скульптинг. Він дозволяє створювати складні та деталізовані моделі.

Характеристики Blender можуть включати:

- текстурування та матеріали бо Blender забезпечує можливість створення та застосування текстур, шейдерів та матеріалів для моделей. Є можливість використовувати зображення, процедурні шуми та інші методи досягнення бажаного візуального ефекту;

- анімація бо Blender підтримує створення анімації, включаючи ключові кадри, криві анімації, кінематику та динаміку. Є можливість анімувати об'єкти, персонажів, камери та світло всередині Blender;

- симуляція бо Blender включає функції для симуляції фізичних об'єктів, таких як тканини, рідини, тверді тіла та частинки. Є можливість створювати реалістичні ефекти фізики та взаємодії у своїх проектах;

- рендеринг бо Blender надає можливість рендерингу сцен та анімації. Він підтримує різні методи рендерингу, включаючи шлях трасування (Path Tracing), глобальне освітлення, рейкастинг та багато іншого. Є можливість створювати високоякісні візуалізації та рендери;

- відео монтаж бо Blender включає інструменти для редагування відео, включаючи накладення, різання, змішування і корекцію кольорів. Є можливість створювати повноцінні відеопроєкти усередині Blender;

- python-скриптинг бо Blender надає можливість програмування та автоматизації завдань із використанням Python. Є можливість створювати власні скрипти, розширення та плагіни для додаткової функціональності та автоматизації;

- Game Engine бо Blender включає вбудований ігровий движок, який дозволяє створювати інтерактивні 3D-ігри та симуляції;

- віртуальна реальність (VR) Blender має інтеграцію з віртуальною реальністю, що дозволяє створювати VR-вміст та візуалізації.

SolidWorks – це комп'ютерна система проектування (CAD), яка широко використовується в галузі машинобудування та промислового дизайну. Вона пропонує безліч переваг та характеристик, які роблять її популярним вибором для інженерів та дизайнерів. Ось деякі з них:

- інтуїтивний інтерфейс та простота використання бо SolidWorks має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що робить його доступним для новачків та дозволяє швидко освоїти основні функції та інструменти. Він пропонує графічне середовище, яке дозволяє візуалізувати та редагувати моделі в режимі реального часу;

- інтегрований підхід SolidWorks пропонує інтегроване середовище проектування, в якому можна створювати 3D-моделі, проводити аналіз та симуляції, створювати креслення та генерувати стандартні технічні документи. Це спрощує робочий процес та підвищує ефективність проектування;

- широкі можливості моделювання SolidWorks надає широкий спектр інструментів для створення 3D-моделей, включаючи екструзію, обертання, видавлювання, усунення, сполучення та інші операції. Він також підтримує параметричне моделювання, що дозволяє легко змінювати розміри та форму моделей;

– аналіз та симуляція SolidWorks включає функції аналізу та симуляції, які дозволяють оцінювати міцність, деформації, динамічну поведінку та інші характеристики моделей. Це допомагає виявити потенційні проблеми та оптимізувати конструкцію;

– генерація креслень та документації SolidWorks автоматизує процес створення креслень та технічної документації на основі 3D-моделей. Він пропонує інструменти для створення розмірних ланцюжків, специфікацій, складальних креслень та інших документів, що полегшує підготовку до виробництва;

– управління даними SolidWorks надає інструменти для управління даними проекту, контроль доступу, спільну роботу та зберігання файлів.

Autodesk 3ds Max – це потужна система тривимірного моделювання, анімації та візуалізації, яка часто використовується в індустрії розваг, архітектурі та візуальних ефектах. Ось деякі з переваг та характеристик 3ds Max:

– широкий спектр можливостей 3ds Max пропонує безліч інструментів та функцій для створення високоякісних 3D-моделей, анімації, візуалізації та спецефектів. Він включає інструменти для моделювання, текстурування, освітлення, рендерингу, симуляції фізики та багато іншого;

– потужний інструментарій моделювання 3ds Max пропонує різноманітні методи моделювання, включаючи полігональне моделювання, поверхневі NURBS, субдивізіонні поверхні, моделювання процедурних об'єктів та інші техніки. Це дозволяє створювати складні та деталізовані 3D-моделі;

– просунута система анімації 3ds Max має потужні інструменти анімації, включаючи ключові кадри, криві анімації, ІК-солвери, системи частинок та динаміку. Це дозволяє створювати реалістичні та динамічні анімації об'єктів, персонажів та камер;

– гнучкий інструмент рендерингу 3ds Max надає можливість використання різних движків рендерингу, таких як Arnold, V-Ray і Mental

Ray, що дозволяє отримувати високоякісні візуалізації та рендери. Він також підтримує розподілений рендеринг, що пришвидшує створення рендерів;

– інтеграція з іншими програмами 3ds Max легко інтегрується з іншими програмами Autodesk, такими як AutoCAD та Revit, а також з популярними програмами для роботи з 3D-графікою та анімацією. Це полегшує спільну роботу та обмін даними між різними програмами та проектами.

Відштовхуючись від характеристик систем, для проекту більше підходить Blender.

У цьому розділі було проаналізовано три популярні програмні середовища для 3D-моделювання: Blender, SolidWorks і Autodesk 3ds Max. Порівняння їхніх характеристик дозволило оцінити переваги та недоліки кожного з них за кількома критеріями, такими як доступність, функціональність, підтримка платформ, можливість анімації та випробувань.

На основі отриманих результатів вибір було зупинено на Blender, оскільки він є безкоштовним, багатоплатформним, має широкий функціонал і підтримує велику кількість форматів файлів. Цей інструмент забезпечує високу гнучкість у налаштуванні, потужні можливості рендерингу, інтеграцію з Python для автоматизації та велику активну спільноту. Ці характеристики роблять Blender найкращим вибором для реалізації завдань дипломного проекту з моделювання та розробки системи керування FPV-дроном.

2.2 Розроблення структури FPV дрона

Розробка структури FPV-дрону (First Person View) передбачає створення базової конструкції, що забезпечує стійкість, ефективність та відповідність вимогам до польоту. Основні етапи цієї розробки включають вибір компонентів, визначення їх розташування, проектування корпусу і оптимізацію ваги [15].

2.2.1 Вибір основних компонентів FPV дрона

Для FPV-дрону визначальними є компоненти, що забезпечують функціональність та стабільність пристрою [16].

Рама тут важливі матеріал і форма рами бо вони впливають на міцність і вагу.

Матеріал рами – вуглецеве волокно (Carbon Fiber) рисунок 2.1.



Рисунок 2.1 – Вуглецеве волокно (Carbon Fiber)

Переваги:

- легка вага, що покращує маневреність та час польоту;
- висока міцність, що забезпечує довговічність та стійкість до ударів;
- поглинає вібрації, що зменшує шум у камері FPV.

Недоліки:

- найдорожче в порівнянні з іншими матеріалами;
- може тріскатись при сильних ударах.

Форма рами – Х-форма була вибрана завдяки своїм характеристикам, рисунок 2.2:



Рисунок 2.2 – Рама Х-форми

- поступово розподіляє вагу між моторами;
- ідеально підходить для гоночних та фрістайл-дронів через високу маневровість;
- найпоширеніший тип для FPV.

Мотори та ESC (регулятори швидкості) підбираються залежно від розмірів та ваги дрона.

Мотори FPV-дрону класифікуються за такими параметрами.

Розмір двигунів (формат) зазвичай позначається двома числами 2807.

При цьому 28 – діаметр статора (мм), що визначає потужність. Тоді 07 – висота статора (мм), що впливає на момент, що крутить. І для великих (6-7 дюймів та більше): 2306, 2407. Кількість оборотів (KV) позначається як KV (RPM/V) – кількість обертів за хвилину за кожен вольт. Вибір залежить від напруги акумулятора (2S, 3S, 4S тощо) і типу дрону. Якщо вищий KV – більш швидкі мотори, але менша ефективність та більший нагрів. Ідеально для гоночних FPV-дронів. Нижчий KV – найбільший момент, що крутить, підходить для більш важких дронів і кінематографічних моделей.

Для проекту були вибрані мотори які підійдуть і для гоночних FPV-дронів так і для кінематографічних: 1300KV для 6S, рисунок 2.3.



Рисунок 2.3 – Мотори EMAX ECO II 2807 1300KV

ESC (регулятори швидкості) управляє роботою двигунів, регулюючи подачу струму. Основні параметри для вибору розглянемо нижче.

Максимальний струм (A), регулятори повинні витримувати струм, споживаний двигунами на максимальних обертах. Зазвичай вказується максимальний та короткочасний (burst current) та були вибрані ESC із запасом на 20–30 % максимального струму двигунів.

Сучасні ESC підтримують різні протоколи зв'язку з польотним контролером: DShot (1200, 600, 300) – швидший та надійніший, краще використовувати; PWM/Oneshot/Multishot – менш ефективні, але можуть бути у бюджетних варіантах. Окремі ESC, монтуються на кожен двигун. Перевага – легше замінити при виході з ладу. 4-в-1 ESC один модуль для всіх двигунів. Більш компактний варіант ідеальний для невеликих дронів.

Акумулятор літій-полімерні (LiPo) батареї підбираються за ємністю (мАч) та кількістю осередків (S), що впливає на напругу. Літій-полімерні (LiPo) акумулятори є найпоширенішим вибором для FPV-дронів завдяки високій енергоємності, легкій вазі та здатності забезпечувати значний струм. Вибір акумулятора залежить від декількох ключових параметрів рисунок 2.4.

Основні характеристики акумулятора – кількість осередків (S), параметр, який визначає напругу батареї, кожен осередок має номінальну напругу 3,7 В (повністю заряджений – 4,2 В).

Загальна напруга батареї кількість комірок 3,7 В. Наприклад: 2S – 7,4 В; 4S – 14,8 В; 6S – 22,2 В.

Для невеликих FPV-дронів (до 3 дюймів пропелерів) 2S-3S. Для середніх та великих FPV-дронів (5 дюймів і більше): 4S або 6S залежно від конфігурації двигунів та ESC.

Місткість (мАг) визначає час польоту. Однак із підвищенням ємності зростає вага акумулятора, що може знижувати ефективність. Для дронів з пропелерами до 3 дюймів: 450-850 мАг. Для 5-дюймових дронів: 1300-1800 мАг. Для кінематографічних дронів (6+ дюймів): 2000-3000 мАг. Розрядний струм (C-rate) це характеристика, яка вказує на максимальний струм, який може видавати батарея без пошкодження. Максимальний струм Місткість C-rate. Батарея 1300 мАг 75 С забезпечує струм 97,5 А. Мотори та ESC повинні працювати в межах цього значення, інакше акумулятор перегріється або вийде з ладу.



Рисунок 2.4 – Акумулятор літій-полімерний

У політному контролері плата керування відповідає за стабільність польоту. Вибір залежить від сумісності з прошивкою (наприклад, Betaflight). Політний контролер (Flight Controller, FC) є центральним елементом FPV-

дрону, який обробляє дані від сенсорів, відповідає за стабільність польоту та виконує команди пілота. Правильний вибір FC залежить від характеристик дрону та його призначення [17].

Ключові критерії вибору сумісність із прошивкою для FPV-дронів. Betaflight для гоночних та фрістайл-дронів, забезпечує високу продуктивність та простоту налаштування. INAV для дронів із функціями автономного польоту або GPS. ArduPilot для складних проектів із навігацією. Вибираємо контролери, які підтримують Betaflight, якщо дрон призначений для гоночних або фрістайл польотів.

Процесори польотного контролера визначають швидкість обробки даних та продуктивність. Вибір залежить від запланованого навантаження F4-процесори. Добрий баланс між продуктивністю та ціною. Підтримується більшість функцій Betaflight. F7-процесори з вищою продуктивністю, підходять для більш складних дронів, підтримують більше UART-портів (для підключення аксесуарів, наприклад GPS). H7-процесори є найпотужніші для просунутих FPV-дронів та проектів з високими вимогами до обчислень.

FPV-система камера та відеопередавач, що забезпечують реальний час передачі зображення пілоту через окуляри або монітор. FPV-система складається з камери, відеопередавача (VTX) та приймача, що працюють разом для передачі відеозображення в реальному часі. Правильний вибір компонентів забезпечує чітке зображення, мінімальну затримку та стабільну передачу сигналу. FPV-камера визначає якість зображення, яке пілот отримує під час польоту.

Основні характеристики: роздільна здатність камери SD (Standard Definition): 600-1200 Твл (телевізійні лінії), HD (High Definition): 720 p, 1080 p або вище Для цифрових систем (наприклад, DJI, HDZero).

Формат зображення 4:3 – для камер із великим вертикальним полем огляду, 16:9 – для широкоформатного зображення. Вибираємо відповідно до ваших окулярів FPV (більшість підтримують обидва формати). Поле огляду (FOV) в діапазоні (120-160°). Підійде 150-160° для швидкого польоту, 120-

140° для кінематографії. Сенсор CMOS гарна якість зображення, чутливість до світла, CCD краще обробляє світлові спотворення, але рідко використовується через прогрес CMOS.

Аналогові: Foxeer Predator V5, RunCam Swift 2; цифровий: DJI FPV Camera, Caddx Polar.

Відеопередавач (VTX) передає відеосигнал від камери на окуляри або монітор. Основні характеристики: потужність передачі (мВт): 25 мВт; дозволено для використання у багатьох країнах, радіус дії до 500 м, 200-800 мВт. Підходить для польотів середні дистанції. 1000 мВт: для довгих дистанцій (Long Range).

Аналогові системи працюють на частоті 5,8 ГГц. Підтримка 48 каналів дозволяє уникати перешкод. Цифрові системи мають частотні діапазони (наприклад, DJI використовує спеціальний протокол).

Режим управління SmartAudio/IRC Tramp дозволяє змінювати налаштування потужності та каналів через польотний контролер.

FPV-окуляри або монітор для отримання та перегляду зображення. Основні характеристики.

Роздільна здатність камери для аналогових: 640 x 480 та вище. Для цифрових: 1080 p для кращої чіткості.

Патч-антени для дальності, окулярні антени (омні) для покриття у всіх напрямках, використовуємо комбінацію патч та омних антен для найкращого сигналу.

2.2.2 Проектування розташування компонентів FPV дрона

Процес проектування FPV-дрону є комплексним завданням, що вимагає врахування низки важливих аспектів для забезпечення надійної роботи, стабільності та ефективності під час польотів. Основними етапами проектування є: баланс ваги – визначення правильного розташування компонентів для досягнення оптимального центру тяжіння дрону; зручність установки – компоненти, що потребують частого доступу (акумулятор,

антени, відеопередавач), мають бути розташовані таким чином, щоб забезпечити зручність обслуговування, заміни чи регулювання; захист FPV-компонентів – забезпечення надійного захисту критичних елементів дрону (FPV-камери, відеопередавача, антен) від механічних пошкоджень під час падіння або ударів.

Послідовність проектування FPV-дрону включає: вибір та розташування компонентів, починаючи з найважчих (акумуляторів) для балансування центру ваги; оптимізація геометрії та дизайну рами для рівномірного розподілу ваги, стабільності та захисту основних елементів. Формування системи керування та встановлення додаткових периферійних компонентів (FPV-камери, антен, GPS); перевірка та тестування балансу та зручності обслуговування через практичні випробування.

Баланс ваги для стабільного польоту центр ваги має бути близьким до геометричного центру рами. Правильний баланс ваги є ключовим фактором для стабільного польоту, маневровості та ефективності дрону. Центр тяжкості повинен бути максимально близьким до геометричного центру рами, щоб уникнути перевантаження моторів і забезпечити рівномірний розподіл сил під час польоту. Розташування компонентів акумулятор найважчий компонент дрону. Розташуйте акумулятор так, щоб його вага компенсувала розташування інших компонентів, наближаючи центр ваги до середини рами. Для гоночних дронів акумулятор зазвичай встановлюється згори або знизу рами в центрі. Камера FPV та додаткові знімальні пристрої (наприклад, GoPro) розташовані ближче до передньої частини рами. Якщо камера є важкою, помістіть акумулятор назад для компенсації. Політний контролер та ESC. Монтуються ближче до центру рами для зменшення вібрацій та збереження балансу. Антени та GPS легкі компоненти (антени, GPS) слід розміщувати так, щоб вони не зміщували центр ваги.

Геометричний центр, центр тяжіння має бути уздовж осі між передніми та задніми моторами. На одній висоті з рамою (особливо важливо для важких компонентів, щоб уникнути перекидання дрону). Ось тяги

крутний момент, створений двигунами, повинен бути рівномірним, тому будь-які відхилення центру тяжіння можуть вплинути на продуктивність. Гоночні FPV-дрони центр тяжіння має бути трохи зміщений вперед, оскільки дрон часто летить з нахилом уперед. Балансування переконайтеся, що дрон залишається рівним, коли його підвішують за середину рами. Кінематографічні FPV-дрони центр тяжіння має бути точно у центрі для стабільного відеозапису. Балансування розташуйте камеру на передній частині, акумулятор – у задній, забезпечуючи симетрію. Мікродрони компоненти часто легкі, але важливо, щоб акумулятор не створював перекося. Балансування переконайтеся, що мікродрони зберігають рівновагу навіть з невеликими змінами розташування компонентів. Перевірка балансу поставте дрон на тонкий об'єкт (наприклад, олівець) під центром рами. Дрон повинен залишатися в рівновазі. Регулювання на вагу використовуйте змінні кріплення для акумулятора (липучки або рейки), щоб усунути його для компенсації ваги інших компонентів. Літаючі випробування запусіть дрон на низькій висоті і перевірте, чи він летить рівно. При необхідності внесіть корективи до компонентів.

Зручність встановлення компоненти, що потребують частого доступу (акумулятор, антени), повинні бути встановлені у доступних місцях. Місце встановлення акумулятора найчастіше акумулятори розташовують зверху чи знизу рами, залежно від конструкції дрону. Він має бути закріпленний за допомогою липучок або силіконових ременів для надійності. Доступність місця кріплення повинно дозволяти швидке встановлення та зняття акумулятора для заряджання або заміни. Уникайте встановлення компонентів, що ускладнюють доступ до батареї.

FPV-антени місце встановлення. Тож, антени слід монтувати вертикально чи під кутом для оптимального сигналу. Встановлюються на краю рами або підвішуються на окремих кріпленнях, щоб зменшити ризик пошкодження. Розташовуйте антени так, щоб вони були легко замінювані

або регульовані без необхідності демонтажу інших компонентів. Уникайте зон, де антени можуть зачепитися за пропелери.

Відеопередавач (VTX) встановлення монтується ближче до центру рами для захисту. Забезпечте простий доступ до кнопок керування (зміна каналів, потужності). Розмістіть так, щоб антенний вихід VTX був направлений у зручне місце для підключення антени.

Польотний контролер та ESC монтуються в центральній частині рами для захисту від ударів та збереження балансу. Потрібно бути доступними для підключення периферійних пристроїв (FPV-камери, GPS). Забезпечте доступ до USB-порту контролера для прошивки та налаштувань.

FPV-Камера розміщується у передній частині рами. Має бути захищена від механічних пошкоджень (наприклад, за допомогою захисних кронштейнів). Камера повинна бути встановлена так, щоб її кут нахилу можна легко змінювати.

Захист FPV-компонентів камера та передавач розміщуються так, щоб зменшити ризик пошкодження при падінні. Захист FPV-камери повинна бути встановлена всередині передньої частини рами, захищеної бічними стінками або спеціальним каркасом. Використовуйте раму із вбудованим захистом камери (наприклад, "Cage Design"). Використовуйте алюмінієві або пластикові кронштейни, які кріплять камеру та одночасно захищають її від ударів. Для важких камер, таких як GoPro, використовуйте амортизаційні кріплення або захисні кожухи. Камера повинна мати регульований нахил, але при цьому кріплення має бути достатньо міцним, щоб витримувати удари.

Захист відеопередавача (VTX) ближче до центру рами, де він краще захищений від зовнішніх пошкоджень. Уникайте відкритого розташування на краях або зверху, щоб зменшити ризик прямого удару. Використовуйте термозбіжну трубку або спеціальні захисні корпуси для VTX. Переконайтеся, що антени підтримують гумові амортизатори, щоб зменшити навантаження на гніздо. Забезпечити достатній потік повітря для охолодження VTX, оскільки перегрів може призвести до виходу з ладу.

Захист антен шляхом монтування їх так, щоб вони не знаходились у зоні роботи пропелерів. Для аналогових антен використовуйте гнучкі варіанти, які можуть згинатися під час падіння. Встановіть антени через спеціальні утримувачі з амортизацією. Використовуйте антени з посиленими основами для підвищення довговічності.

Матеріал рами: вибирайте раму із міцного матеріалу, вуглецевого волокна. Рами з бічним захистом або "бамперами" забезпечують додаткову безпеку для FPV-компонентів. Рами з високими бортами чи спеціальними клітинами краще захищають камеру та інші компоненти.

2.2.3 Створення корпусу FPV дрона

Корпус FPV дрона є однією з ключових частин конструкції, яка забезпечує надійність і ефективність роботи апарата. Він виконує не лише захисну функцію, оберігаючи внутрішні компоненти від пошкоджень, але й впливає на аеродинамічні характеристики, вагу та загальну продуктивність дрона.

Розробка корпусу потребує врахування кількох факторів: вибір матеріалів, оптимізація дизайну для мінімізації ваги та забезпечення достатньої міцності, а також створення умов для встановлення всіх необхідних компонентів [18].

У цьому розділі розглянемо етапи створення корпусу FPV дрона та основні принципи, які слід враховувати при його розробці.

Аеродинамічні властивості форма корпусу має мінімізувати опір повітря.

Аеродинамічні властивості корпусу FPV-дрону мають велике значення для зменшення опору повітря, поліпшення стабільності польоту та підвищення ефективності використання енергії.

Форма корпусу буде обтічна: корпус із плавними округлими лініями мінімізує турбулентність та опір повітря.

Уникайте гострих кутів або великих плоских поверхонь, які можуть створювати додатковий опір.

Корпус повинен бути компактним і близьким до рами, щоб зменшити загальну площу, що контактує з повітрям.

Внутрішнє розташування максимальна кількість компонентів має бути прихована всередині корпусу.

Електроніка та кабелі не повинні виступати за межі рами.

Правильний баланс компонентів забезпечує плавний рух та зменшує аеродинамічний дисбаланс.

Закриті елементи антени, камери та інші виступаючі частини можна захистити аеродинамічними кожухами.

Не допускайте, щоб корпус створював турбулентність, яка може заважати роботі пропелерів.

Корпус FPV дрону є однією з ключових частин конструкції, що забезпечує надійність та ефективність роботи апарату. Він виконує не тільки захисну функцію, оберігаючи внутрішні компоненти від пошкоджень, але й впливає на аеродинамічні характеристики, вагу та загальну продуктивність дрону.

Розробка корпусу вимагає врахування кількох факторів: вибору матеріалів, оптимізації дизайну для мінімізації ваги та забезпечення достатньої міцності, а також створення умов для встановлення всіх необхідних компонентів.

Розробка структури FPV-дрону є складним процесом, що вимагає балансу між технологічними рішеннями і практичними потребами, але правильний підхід гарантує ефективність і надійність кінцевого продукту
рисунок 2.5.



Рисунок 2.5 – Блок схема процесу створення корпусу

У процесі розробки структури FPV-дрона було виконано аналіз і вибір основних компонентів, що забезпечують стабільну та ефективну роботу пристрою. Детально розглянуто характеристики та переваги таких елементів, як рама, мотори, регулятори швидкості (ESC), акумулятор, політний контролер та система FPV. Обумовлено вибір матеріалів і конструкцій, які забезпечують баланс між міцністю, вагою та продуктивністю дрона.

2.3 Моделювання конструкції FPV дрона

Для моделювання було використано середовище Blender, краще за інші підходить для побудови проекту [18]. Процес моделювання проходив так:

- планування бо перш ніж почати створення моделі, важливо мати ясне уявлення про те, що треба створити тож для початку визначено форму, пропорції та деталі моделі, щоб мати основу для роботи;

- створення примітивів в Blender можна створювати моделі із примітивних форм, таких як куби, сфери, циліндри та інші. Використані ці примітиви, щоб сформувати загальну структуру моделі;

- моделювання бо цей крок включає більш детальне формування моделі, додавання ребер, граней і вершин. Були використані інструменти, такі як Extrude (видавлювання), Loop Cut (розподіл кільця), Bridge Edge Loops (з'єднання кільця граней) та багато інших, щоб створити потрібні форми та деталі які наведені на рисунку 2.6;

- модифікатори Blender пропонує різні модифікатори, які можуть спростити процес створення моделі. Деякі з популярних модифікаторів включають Mirror (дзеркальне відображення), Subdivision Surface (підвищення роздільної здатності поверхні), Boolean (бульові операції) та інші. Модифікатори можуть бути застосовані до моделі для зміни її форми та додавання деталей;

- ригінг та анімація якщо потрібно створити анімовану модель, то можна додати скелетну арматуру (риг) для управління рухом та деформацією моделі. Blender надає потужні інструменти для ригінгу та анімації, які дозволяють створювати різні типи анімації, такі як ходьба, стрибки, деформації та багато іншого.

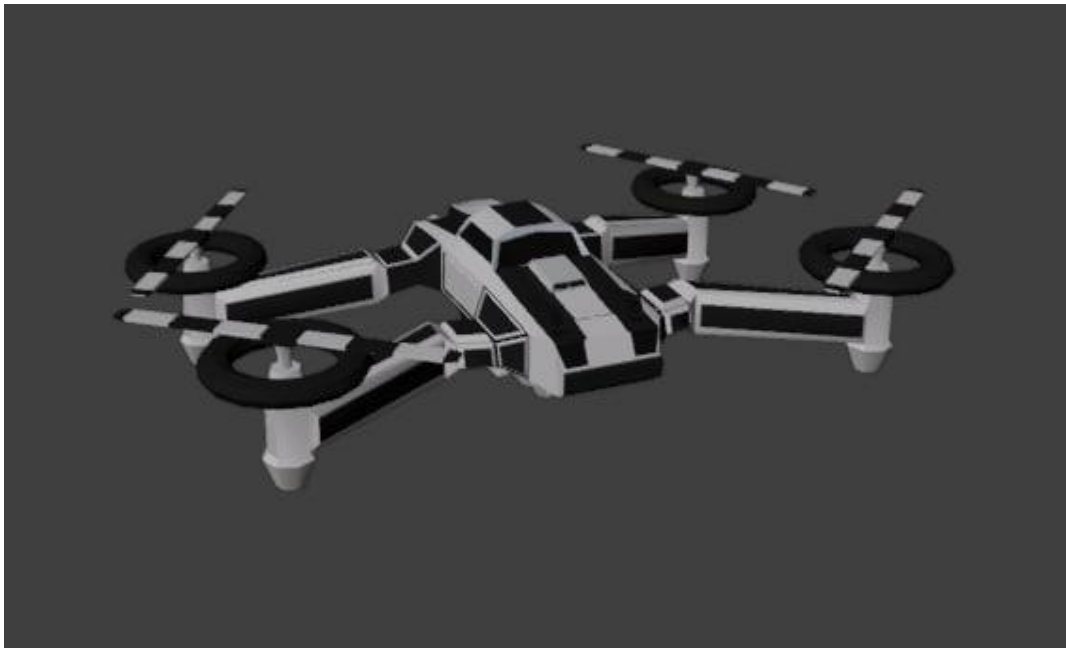


Рисунок 2.6 – Модель FPV дрона

В результаті отримано 3D модель FPV дрона, яка є цифровою репрезентацією його фізичної форми та компонентів [19]. 3D-модель може бути навчальним інструментом для команд «оператора». Модель можна використовувати для навчання операторів FPV, показуючи їм різні рухи, операції та процеси. Крім того, модель може використовуватися в документації проекту, щоб наочно уявити конструкцію та функціональність.

Створена таблиця з порівняннями середовищ які можуть підійти для розробки програмної частини. Краща характеристика 1, середня 2, гірша 3, таблиця 2.2.

Таблиця 2.2 – Середовище розробки програмного забезпечення

Характеристик	Autodesk Tinkercad	Visual Studio	Autodesk AutoCAD
Розширена база компонентів	1	3	2

Продовження таблиці 2.2

Характеристик	Autodesk Tinkercad	Visual Studio	Autodesk AutoCAD
Можливість написання коду	1	1	3
Перевірка роботи моделі	1	2	1
Перевірка роботи коду	1	1	3
Доступність програми	1	1	1

Для розробки програмної частини був вибраний Autodesk Tinkercad – це безкоштовне онлайн-середовище для 3D-моделювання та проектування, створене компанією Autodesk. Результат розробки на рисунку 2.7.

Компанія Autodesk надає доступними інструментами для початківців та досвідчених користувачів, які можуть створювати різні 3D-моделі без необхідності встановлення складного програмного забезпечення на свій комп'ютер, що є зручним для нашої розробки. Розглянемо деякі особливості Autodesk Tinkercad:

- простота використання Tinkercad розроблений таким чином, щоб бути легким у освоєнні, навіть для новачків. Інтуїтивний інтерфейс і прості інструменти дозволяють створювати 3D-моделі без необхідності спеціалізованих навичок або попередніх знань;

- онлайн-доступність Tinkercad працює у браузері, тому немає потреби завантажувати або встановлювати програмне забезпечення. Це забезпечує легкість доступу до інструментів проектування з будь-якого комп'ютера з Інтернетом;

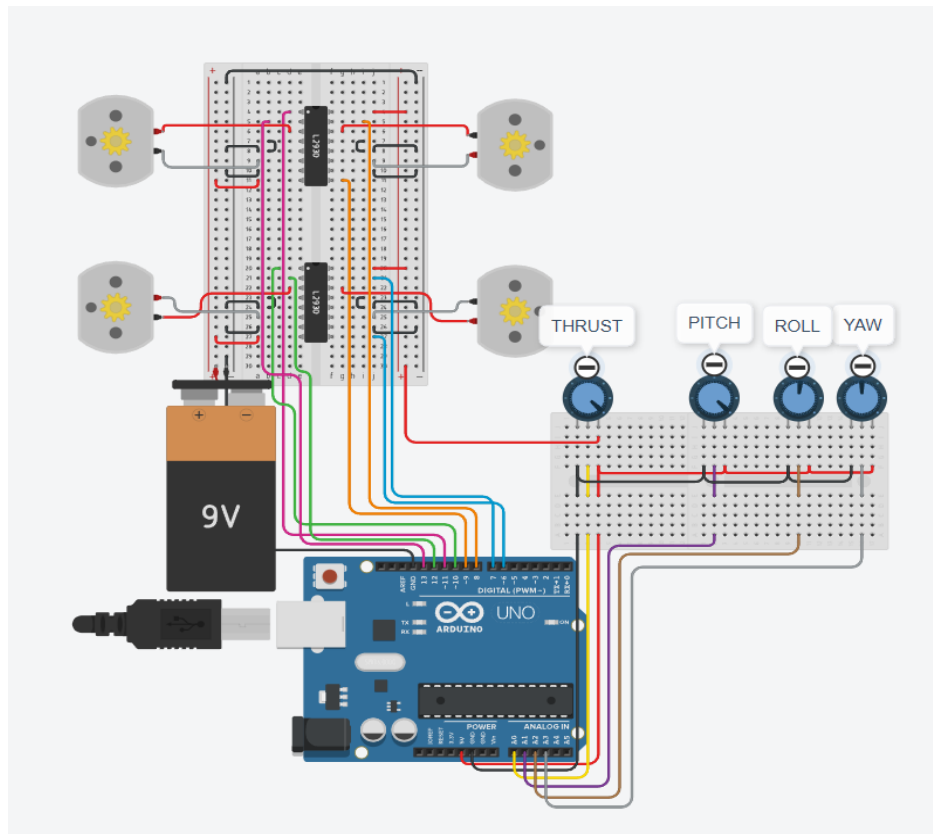


Рисунок 2.7 – Модель по принципу роботи FPV дрона

– 3D-моделювання Tinkercad пропонує широкий спектр інструментів для створення 3D-моделей, включаючи базові форми, комбінування об'єктів, накладання текстур тощо [20]. Він також дозволяє імпортувати існуючі 3D-моделі для подальшого редагування;

– спільне використання та навчання користувачі можуть ділитися своїми проектами з іншими людьми та навіть співпрацювати в режимі реального часу. Це чудово підходить для навчання та спільної роботи над проектами.

Плюси Autodesk Tinkercad:

– простота використання Tinkercad розроблений з упором на простоту використання, що робить його ідеальним вибором для початківців. Інтуїтивний інтерфейс та прості інструменти дозволяють швидко створювати 3D-моделі без потреби у глибоких знаннях 3D-моделювання;

– безкоштовність Tinkercad доступний безкоштовно, що робить його доступним для широкої аудиторії. Ви можете створювати та експортувати 3D-моделі без необхідності купувати дороге програмне забезпечення;

– онлайн-доступність оскільки Tinkercad працює у браузері, ви можете використовувати його на будь-якому комп'ютері з доступом до інтернету без необхідності інстальовати програмне забезпечення. Це також означає, що ваші проекти зберігаються в хмарі, і ви можете отримати доступ до них у будь-який час і з будь-якого пристрою;

– спільнота та навчання Tinkercad має активну спільноту користувачів, де ви можете отримати підтримку, обмінятися ідеями та знайти натхнення. Також доступні навчальні матеріали, включаючи відеоуроки та навчальні проекти, які допоможуть вам освоїти основи 3D-моделювання.

Мінуси Autodesk Tinkercad:

– обмежені можливості Tinkercad орієнтований на базове 3D-моделювання та може не підходити для складних чи професійних проектів. Якщо вам потрібні більш просунуті функції та можливості, вам може знадобитися перейти на інше програмне забезпечення [21];

– обмежений доступ до інструментів у Tinkercad можуть бути відсутні просунуті інструменти та функції, які можуть бути корисними для досвідчених користувачів або для більш складних проектів;

– відсутність можливості роботи в автономному режимі оскільки Tinkercad є онлайн-додатком, ви не зможете використовувати його без доступу до Інтернету.

2.4 Синтез двоконтурної системи управління мотором FPV дрона

На рисунку 2.8 кожен контур системи регулювання електроприводу має регулятори положення та швидкості W_{PC} , W_{PT} і об'єкти регулювання W_{P1} , W_{P2} . Кожен внутрішній контур регулювання підлягає оптимізації, тобто такого вибору параметрів регулятора, при якому задовольняється задана

якість регулювання.

Регулятор положення \Rightarrow Регулятор швидкості \Rightarrow Об'єкт управління (Мотор)

Рисунок 2.8 – Система регулювання мотору

Регулятор будь-якого контуру є в більшості випадків послідовною коригуючою ланкою. Передавальна функція регулятора визначається структурою і параметрами відповідної ланки об'єкта регулювання, а також критерієм оптимізації цього контуру. Кожен внутрішній контур регулювання підлягає оптимізації. Тобто такого вибору параметрів регулятора, при якому задовольняється задана якість регулювання. Під заданою якістю регулювання розуміється перехідний процес при ступінчастому вхідному сигналі, що характеризує певним перерегулюванням і швидкодією. Найбільшого поширення набули два критерії оптимізації: модульний і симетричний.

При модульному критерії оптимізації відпрацювання ступеневого вхідного сигналу відбувається з перерегулюванням. Передавальна функція замкнутого контуру з регулятором приводиться до вигляду коливальної ланки з коефіцієнтом демпфірування $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$

$$F_p = \frac{\frac{1}{\cos}}{2T^2 \cdot \mu_p^2 + 2T\mu_p + 1}. \quad (2.1)$$

де $T\mu$ – мала не компенсуюча постійна часу в контурі;

κ_{oc} – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку.

Тривалість перехідного процесу рівна $4.7 T\mu$ і не залежить від постійної часу об'єкта регулювання. Такий спосіб настройки називається ще налаштуванням на оптимум по модулю (ОМ). Сенс цього терміну в тому, що при налаштуванні на ОМ прагне в широкій смузі частот зробити модуль

частотної характеристики замкнутого контуру до одиниці.

Симетричний критерій оптимізації (СО) широко застосовується в контурах, що містять дві інтегральних ланки або одну інтегральну і одну інерційну ланку в об'єкті регулювання при досить великій постійній часу об'єкта регулювання.

Передавальна функція замкнутого контуру з керованого впливу має вигляд:

$$F_{(p)} = \frac{(4T\mu_p + 1)}{(2T\mu_p + 1) \cdot (4T\mu^2 \cdot p^2 + 2T\mu_p + 1)}. \quad (2.2)$$

При ступінчастій керуючій дії, час першого досягнення вихідної величини сталого значення в контурі, налаштованому на СО, становить 3.1 з $T\mu$, максимальне перерегулювання досягає 43%.

2.5 Висновки до розділу 2

У розділі виконано моделювання конструкції FPV-дрона, що дозволило створити точну цифрову репрезентацію пристрою. Для побудови 3D-моделі було використано середовище Blender, яке забезпечило необхідні інструменти для деталізації конструкції та застосування модифікаторів. Створена модель наочно демонструє фізичну форму та компоненти дрона, а також може використовуватися для навчання операторів FPV та документації проєкту.

Для розробки програмної частини управління дрону обрано середовище Autodesk Tinkercad, що забезпечує простоту використання, онлайн-доступність та інтеграцію з 3D-моделюванням. Цей вибір обґрунтований його доступністю для новачків, широкими можливостями базового 3D-дизайну та інтеграцією з інструментами навчання.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ FPV ДРОНА

3.1 Визначення параметрів FPV дрону, що підлягають комп'ютеризованому управлінню

У сучасних FPV-дронах комп'ютеризоване управління є ключовим елементом, що забезпечує точність, ефективність та надійність у виконанні завдань.

Для досягнення оптимальної роботи FPV-дрону, необхідно визначити основні параметри, які можна контролювати за допомогою комп'ютеризованих систем. Дані для цих моделей отримані з коду та збірки в Tinkercad. Ці параметри впливають на динаміку польоту, стабільність апарату та його адаптацію у різних умовах середовища. Основні параметри, які потрібно враховувати, розглянемо нижче.

Положення дрону в тривимірному просторі, Position (x, y, z). Вхідні параметри:

- маса дрону (m) = 0,5 кг;
- загальна тяга двигунів (F) = 15 Н;
- кут ристання (ψ) = $30^\circ = \pi/6$ радіан;
- кут тангажу (θ) = $15^\circ = \pi/12$ радіан;
- прискорення вільного падіння (g) = 9,81 м/с²;

$$\ddot{x} = (\cos \psi \cdot \cos \theta) \cdot \left(\frac{F}{m}\right). \quad (3.1)$$

Розрахунок прискорення по осі X:

$$\ddot{x} = (\cos \psi \cdot \cos \theta) \cdot \left(\frac{F}{m}\right) = \left(\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{12}\right)\right) \cdot \left(\frac{15}{0,5}\right) =$$

$$= (0,866 \cdot 0,9659) \cdot 30 = 0,837 \cdot 30 = 25,11 \frac{\text{M}}{\text{c}^2}, \quad (3.2)$$

де \ddot{x} – прискорення по осі X_ψ (ψ) – кут ристання (поворот навколо вертикальної осі);

θ (theta) – кут тангажа (нахил вперед-назад);

F – загальна тяга всіх двигунів – маса дрону.

$$\ddot{y} = (\sin \psi \cdot \cos \theta) \cdot \left(\frac{F}{m}\right). \quad (3.3)$$

Розрахунок прискорення по осі Y :

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= (\sin \psi \cdot \cos \theta) \cdot \left(\frac{F}{m}\right) = \left(\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{12}\right)\right) \cdot \left(\frac{15}{0,5}\right) = \\ &= (0,5 \cdot 0,9659) \cdot 30 = 0,483 \cdot 30 = 14,49 \frac{\text{M}}{\text{c}^2}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

де \ddot{y} – прискорення по осі $Y \sin \psi$ – синус кута ристання;

$\cos \theta$ – косинус кута тангажа;

F/m – відношення тяги до маси

$$\ddot{z} = -g + (\cos \theta) \cdot \left(\frac{F}{m}\right), \quad (3.5)$$

Розрахунок прискорення по осі Z :

$$\begin{aligned} \ddot{z} &= -g + (\cos \theta) \cdot \left(\frac{F}{m}\right) = -9,81 + \left(\cos\left(\frac{\pi}{12}\right)\right) \cdot \left(\frac{15}{0,5}\right) = \\ &= -9,81 + (0,9659 \cdot 30) = -9,81 + 28,98 = 19,17 \frac{\text{M}}{\text{c}^2}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

де \ddot{z} – прискорення по вертикальній осі Zg – прискорення вільного падіння ($\approx 9,81 \text{ м/с}^2$);

$\cos \theta$ – косинус кута тангажа;

F/m – відношення тяги до маси.

Результати через одну секунду польоту швидкості (інтегрування прискорення по часу $t = 1 \text{ с}$):

$$v_x = \ddot{x} \cdot t = 25,11 \cdot 1 = 25,11 \text{ М/с} \quad (3.7)$$

$$v_y = \ddot{y} \cdot t = 14,49 \cdot 1 = 14,49 \text{ М/с} \quad (3.8)$$

$$v_z = \ddot{z} \cdot t = 19,17 \cdot 1 = 19,17 \text{ М/с} \quad (3.9)$$

Позиції (інтегрування швидкості по часу $t = 1 \text{ с}$):

$$x = \frac{1}{2} \cdot \ddot{x} \cdot t^2 = 0,5 \cdot 25,11 \cdot 1^2 = 12,56 \text{ м}, \quad (3.10)$$

$$y = \frac{1}{2} \cdot \ddot{y} \cdot t^2 = 0,5 \cdot 14,49 \cdot 1^2 = 7,25 \text{ м}, \quad (3.11)$$

$$z = \frac{1}{2} \cdot \ddot{z} \cdot t^2 = 0,5 \cdot 19,17 \cdot 1^2 = 9,59 \text{ м}. \quad (3.12)$$

Дрон рухається вперед (X) зі значним прискоренням через великий кут тангажу. Бічний рух (Y) присутній через кут ривання та вертикальний рух (Z) позитивний, що означає набір висоти. Тяга двигунів – ($28,98 \text{ м/с}^2$) перевищує гравітацію – ($9,81 \text{ м/с}^2$). Результуюче вертикальне прискорення – $19,17 \text{ м/с}^2$.

Для розрахунку параметрів польоту дрону було за основу взято математичні моделі, які описують зв'язок між широтно-імпульсною модуляцією (PWM) сигналів. Тягою моторів, кутами орієнтації,

прискореннями та позицією у просторі. Дані для цих формул отримуються з коду та збірки в Tinkercad, представлених раніше, що визначає базові параметри дрону, взаємозв'язок між PWM і тягою кожного мотора, а також алгоритми стабілізації та управління польотом. Цей підхід дозволяє конвертувати PWM-сигнали у тягу для кожного з чотирьох моторів та розрахувати орієнтацію дрону в просторі (тангаж, крен, ристання). Можемо моделювати динаміку польоту, зокрема прискорення, швидкість і позицію в тривимірному просторі; інтегрувати дані з джойстиків, перетворюючи їх у PWM-сигнали, які керують рухом і стабілізацією дрону.

Формули включають всі етапи обчислень, від базових параметрів до комплексного управління положенням дрону у просторі. Цей набір математичних залежностей служить основою для точного управління польотом, що є критично важливим у розробці стабільних і маневрених систем для дронів. Базові параметри:

- m – маса дрону (кг);
- g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²);
- PWM_{max} – максимальне значення PWM (255).

Перетворення PWM в тягу для кожного мотора дрону можна представити у вигляді:

$$F_i = \left(\frac{PWM_i}{PWM_{max}} \right) \cdot F_{max}, \quad (3.13)$$

- де $i = 1 \dots 4$ при цьому $i = 1$ – це LT – тяга лівого верхнього мотора;
 $i = 2$ – це LB – тяга лівого нижнього мотора;
 $i = 3$ – це RT – тяга правого верхнього мотора;
 $i = 4$ – це RB – тяга правого нижнього мотора.

PWM_i – це конкретний канал, який генерує PWM-сигнал для мотору, де що від 0 (мінімальний сигнал, мотор вимкнений) до PWM_{max} (максимальний сигнал, мотор обертається на максимальній швидкості) значення PWM_i пропорційне потужності, яка подається на мотор. Чим

більше PWM_i , тим більшу тягу створює мотор; PWM_{max} – максимальне значення PWM, яке може бути подане на мотор. Контролер працює з 8-бітними сигналами, $PWM_{max} = 255$. PWM_{max} використовується для нормалізації значень PWM_i . Це дозволяє визначити, яку частку від максимальної потужності отримує мотор; F_{max} , максимальна сила (тяга), яку може створити один мотор за умови, що на нього подано максимальне значення PWM ($PWM_i = PWM_{max}$).

Тяга кожного мотора прямо пропорційна значенню PWM-сигналу, поданого на цей мотор. Коли $PWM_i = 0$, тяга F_i дорівнює нулю (мотор не працює). Коли $PWM_i = PWM_{max}$, тяга F_i досягає свого максимуму (F_{max}). Таким чином, контролер польоту змінює значення PWM_i для кожного мотора залежно від необхідного напрямку руху, стабілізації або маневрів дрону. Визначення сумарної тяги дрону пропонується представити, як:

$$F_{total} = F_{LT} + F_{LB} + F_{RT} + F_{RB}, \quad (3.14)$$

де F_{total} – загальна сила, яка створюється всіма моторами дрону разом. Вона визначає, чи зможе дрон залишатися в повітрі, підніматися, знижуватися чи виконувати маневри:

- F_{LT} – тяга лівого верхнього мотора;
- F_{LB} – тяга лівого нижнього мотора;
- F_{RT} – тяга правого верхнього мотора;
- F_{RB} – тяга правого нижнього мотора.

Контролер польоту дрону постійно регулює тягу всіх чотирьох моторів, щоб підтримувати баланс. Якщо всі мотори генерують однакову тягу, то F_{total} спрямована вертикально вгору, і дрон піднімається або зависає. Якщо тяги моторів різняться, виникають моменти сили, які змінюють орієнтацію дрону (тангаж, крен або ристання).

Тангаж (θ) і крен (ϕ) є ключовими показниками для управління рухом дрону, відповідаючи за його нахили вперед/назад і вліво/вправо, що

забезпечує переміщення в горизонтальній площині. Момент рискання (Muaw) дозволяє змінювати напрямок польоту, обертаючи корпус дрону навколо вертикальної осі. Ці кути орієнтації є основними параметрами для стабілізації і маневрування дрону в просторі. Вони розраховуються на основі тяги кожного мотора, що дозволяє точно керувати польотом і забезпечувати необхідну динаміку руху.

Кут тангажу (pitch) описує нахил дрону вперед або назад можна представити у вигляді:

$$\theta = \arctan \frac{F_{LT} + F_{RT} - F_{LB} - F_{RB}}{F_{TOTAL}}, \quad (3.15)$$

де F_{LT} та F_{RT} – тяга лівого та правого верхніх моторів. Вони відповідають за підйом передньої частини дрону;

F_{LB} і F_{RB} – тяга лівого та правого нижніх моторів. Вони впливають на підйом задньої частини дрону;

F_{TOTAL} – сумарна потяг усіх двигунів. Визначення загальної сили, що діє на дрон у вертикальному напрямку.

Кут крену (roll) описує нахил дрону вліво або вправо можна представити у вигляді:

$$\varphi = \arctan \frac{F_{RT} + F_{RB} - F_{LT} - F_{LB}}{F_{TOTAL}}, \quad (3.16)$$

де F_{RT} і F_{RB} – тяга правих моторів. Вони відповідають за підйом правої сторони дрону;

F_{LT} і F_{LB} – тяга лівих моторів. Вони піднімають ліву сторону дрону;

F_{TOTAL} – загальна тяга всіх моторів.

Момент рискання (yaw) визначає, як дрон обертається навколо своєї вертикальної осі (обертання за годинниковою стрілкою або проти) можна писати, як:

$$M_{yaw} = (F_{LT} + F_{LB} - F_{RT} - F_{RB}) \cdot L, \quad (3.17)$$

де F_{LT} і F_{LB} – тяга лівих моторів, яка створює обертальний момент у напрямку одного обертання;

F_{RT} і F_{RB} – тяга правих моторів, яка створює обертальний момент у протилежному напрямку;

L – відстань від центру мас дрону до моторів. Ця відстань впливає на ефективність створення моменту ристання (чим більша відстань, тим більший момент). Прискорення дрону визначають зміну його швидкості у тривимірному просторі. Вони розраховуються на основі сумарної тяги, маси дрону та його орієнтації (кути тангажу θ і крену ϕ). Вертикальне прискорення описує рух дрону вгору або вниз уздовж осі z можна представити у вигляді формули:

$$a_z = \frac{F_{TOTAL} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi)}{m} - g, \quad (3.18)$$

де F_{TOTAL} – сумарна тяга, створювана всіма моторами. Вона є основним джерелом сили, яка протидіє гравітації;

$\cos(\theta)$ і $\cos(\phi)$ – компоненти орієнтації дрону, які враховують його нахили вперед/назад і вліво/вправо;

$\cos(\theta)$ – враховує нахил по тангажу;

$\cos(\phi)$ – враховує нахил по крену.

Обидві компоненти зменшують ефективність вертикальної тяги, коли дрон нахилений:

m – маса дрону визначає, скільки сили потрібно для подолання інерції;

g – прискорення вільного падіння ($\approx 9,81 \text{ м/с}^2$) представляє силу тяжіння, яка завжди діє вниз.

Поздовжнє прискорення описує рух дрону вперед або назад уздовж осі x можна представити у вигляді:

$$a_x = \frac{F_{TOTAL} \cdot \sin(\theta)}{m}, \quad (3.19)$$

де F_{TOTAL} – сумарна тяга, створює горизонтальну складову, яка відповідає за рух вперед/назад;

$\sin(\theta)$ – синус кута тангажу визначає, яка частка сумарної тяги спрямована вперед або назад залежно від нахилу дрону;

m – маса дрону обмежує прискорення, яке можна досягти для заданої сили.

Бічне прискорення описує рух дрону вправо або вліво уздовж осі у можна представити у вигляді:

$$a_y = \frac{F_{TOTAL} \cdot \sin \varphi}{m}, \quad (3.20)$$

де F_{TOTAL} – сумарна тяга створює горизонтальну складову, яка відповідає за бічний рух;

$\sin(\varphi)$ – синус кута крену визначає, яка частка сумарної тяги спрямована вправо або вліво залежно від нахилу дрону;

m – маса дрону.

Розрахунок швидкостей (інтегрування прискорень) описує зміну швидкості дрону на кожній осі (x, y, z) в залежності від прискорення та кроку часу. Для кожної осі ($i = x, y, z$):

$$V_i(t) = V_i(t - 1) + a_i \cdot \Delta t, \quad (3.21)$$

де $V_i(t)$ – швидкість в момент часу t ;

$V_i(t - 1)$ – швидкість в момент часу $t-1$;

a_i – прискорення по відповідній осі;

Δt – крок часу.

Розрахунок позицій (інтегрування швидкостей) описує зміну позиції дрону вздовж кожної осі (x, y, z) у тривимірному просторі, враховуючи швидкість, прискорення та час. Для кожної осі (i = x, y, z):

$$s_i(t) = s_i(t - 1) + V_i \cdot \Delta t + \frac{a_i \cdot \Delta t^2}{2}, \quad (3.22)$$

де $s_i(t)$ – позиція в момент часу t;

V_i – швидкість по відповідній осі;

a_i – прискорення по відповідній осі.

Перетворення значень джойстиків в PWM описує, як значення джойстиків (вхідні сигнали керування) перетворюються в PWM-сигнали, які регулюють тягу моторів дрону.

Базова тяга значення PWM-сигналу, яке відповідає загальній потужності моторів для забезпечення підйому дрону:

$$PWM_{base} = \left(\frac{ThrustValue}{1023} \right) \cdot 255, \quad (3.23)$$

де ThrustValue – вхідне значення джойстика, яке визначає загальну тягу. Зазвичай ThrustValue змінюється від 0 до 1023;

1023 – максимальне значення вхідного сигналу джойстика;

255 – максимальне значення PWM, яке контролер може передати мотору.

Корекція руху вперед/назад PWM-сигналу, яка відповідає за нахил дрону вперед або назад для забезпечення руху в поздовжньому напрямку:

$$PWM_{fb} = \left(\left(\frac{FBMvalue}{1023} \right) \cdot 2 - 1 \right) \cdot \frac{PWM_{base}}{4}, \quad (3.24)$$

де FBMvalue – значення джойстика для керування рухом вперед/назад (від 0 до 1023);

PWMbase – базове значення тяги.

Корекція руху вправо/вліво PWM-сигналу для створення нахилу дрону вправо або вліво, що забезпечує бічний рух:

$$PWM_{rl} = \left(\left(\frac{RLMvalue}{1023} \right) \cdot 2 - 1 \right) \cdot \frac{PWMbase}{4}, \quad (3.25)$$

де RLMvalue – значення джойстика для керування бічним рухом (від 0 до 1023);

PWMbase – базове значення тяги.

Корекція обертання PWM-сигналу, яка відповідає за обертання дрону навколо вертикальної осі (рискання).

$$PWM_{rot} = \left(\left(\frac{RLRvalue}{1023} \right) \cdot 2 - 1 \right) \cdot \frac{PWMbase}{4}, \quad (3.26)$$

де RLRvalue – значення джойстика для керування обертанням (від 0 до 1023);

PWMbase – базове значення тяги.

Фінальні значення PWM для кожного мотора дрону розраховуються шляхом поєднання базового PWM-сигналу (PWMbase) та корекцій (PWMfb, PWMrl, PWMrot):

$$PWM_{lt} = PWM_{base} - PWM_{fb} - PWM_{rl} - PWM_{rot}, \quad (3.27)$$

$$PWM_{lb} = PWM_{base} - PWM_{fb} - PWM_{rl} - PWM_{rot}, \quad (3.28)$$

$$PWM_{rt} = PWM_{base} - PWM_{fb} - PWM_{rl} - PWM_{rot}, \quad (3.29)$$

$$PWM_{rb} = PWM_{base} - PWM_{fb} - PWM_{rl} - PWM_{rot}, \quad (3.30)$$

де PWMbase – базова тяга для підтримки польоту;

PWMfb – корекція для руху вперед/назад (зменшує тягу для нахилу вперед, збільшує для нахилу назад);

PWMrl – корекція для руху вправо/вліво (зменшує тягу для нахилу вправо, збільшує для нахилу вліво);

PWMrot – корекція для обертання (зменшує тягу для обертання за годинниковою стрілкою, збільшує для обертання проти годинникової стрілки).

3.2 Розробка математичної моделі для комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрону

Після того, як визначено всі значущі параметри для забезпечення стабільного та керованого польоту FPV дрону, пропонуємо математичну модель для комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрону, що дозволить формалізувати всі ключові параметри FPV дрону.

Параметр D – безліч всіх можливих станів дрону, яке можна представити як декартовий добуток підмножин:

$$D = (P \cdot V \cdot A \cdot O \cdot M \cdot C), \quad (3.31)$$

де $P = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3\}$ – множина можливих позицій дрону у просторі;

$V = \{(v_x, v_y, v_z) \in \mathbb{R}^3\}$ – множина можливих швидкостей;

$A = \{(a_x, a_y, a_z) \in \mathbb{R}^3\}$ – множина можливих прискорень;

$O = \{(\theta, \varphi, \psi) \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \cdot \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \cdot [-\pi, \pi]\}$ – множина кутів орієнтації

(тангаж, крен, ролання);

$M = \{(F_{LT}, F_{LB}, F_{RT}, F_{RB}) \in [0, F_{max}]^4\}$ – множина значень тяги двигунів;

$C = \{(PWM_i) \in [0, 255]^4\}$ – множина керуючих PWM-сигналів.

Функція управління f :

$$I \rightarrow C, \quad (3.32)$$

де I – множина вхідних сигналів з джойстиків;

C – вихідна множина (множина керуючих PWM-сигналів);

$I = \{(\text{ThrustValue}, \text{FBMvalue}, \text{RLMvalue}, \text{RLRvalue}) \in [0, 1023]^4\}$ при цьому ThrustValue – значення джойстика для загальної тяги;

FBMvalue (Forward/Backward Movement value) – значення джойстика для руху вперед/назад;

RLMvalue (Right/Left Movement value) – значення джойстика для руху вправо/вліво;

RLRvalue (Right/Left Rotation value) – значення джойстика для обертання.

Функція перетворення PWM в тягу двигунів g :

$$C \rightarrow M, \quad (3.33)$$

$$g(PWM_i) = \left(\frac{PWM_i}{PWM_{max}} \right) \cdot F_{max}. \quad (3.34)$$

Функція розрахунку орієнтації h :

$$M \rightarrow O,$$

$$\theta = \arctan \cdot \left(\frac{(F_{LT} + F_{RT} - F_{LB} - F_{RB})}{F_{TOTAL}} \right), \quad (3.35)$$

$$\varphi = \arctan \cdot \left(\frac{(F_{RT} + F_{RB} - F_{LT} - F_{LB})}{F_{TOTAL}} \right), \quad (3.36)$$

$$\psi = \left(\frac{(M_{yaw})}{I} \right) dt, \quad (3.37)$$

$$M_{yaw} = (F_{LT} + F_{LB} - F_{RT} - F_{RB}) \cdot L. \quad (3.38)$$

Функція розрахунку прискорень k:

$$O \cdot M \rightarrow A, \quad (3.39)$$

де

$$a_x = \left(\frac{F_{TOTAL} \cdot \sin(\theta)}{m} \right), \quad (3.40)$$

$$a_y = \left(\frac{F_{TOTAL} \cdot \sin(\varphi)}{m} \right), \quad (3.41)$$

$$a_z = \left(\frac{F_{TOTAL} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi)}{m-g} \right). \quad (3.42)$$

Функції інтегрування для отримання швидкостей v:

$$A \cdot T \rightarrow V. \quad (3.43)$$

Функції інтегрування для отримання позицій p:

$$V \cdot T \rightarrow P, \quad (3.44)$$

де T – множина моментів години.

Обмеження системи можна представити як:

$$\forall PWM_i \in C: 0 \leq PWM_i \leq 255, \quad (3.45)$$

$$\forall F_i \in M: 0 \leq F_i \leq F_{max}, \quad (3.46)$$

$$\forall \theta, \varphi \in O: |\theta|, |\varphi|. \quad (3.47)$$

Цільова функція системи управління може бути визначена як:

$$F = \min(|desired_state - current_state|), \quad (3.48)$$

де $desired_state$ – бажаний стан дрону;
 $current_state$ – поточний стан дрону;
 $|desired_state - current_state|$ – модуль різниці між станами;
 $\min(...)$ – операція мінімізації;
 $\in D$ – належність простору станів.

3.3 Дослідження параметрів управління FPV дроном

На основі представлених математичних моделей можна побудувати кілька важливих графіків залежностей для дослідження параметрів управління FPV дроном.

Залежність тяги двигунів від PWM-сигналів (функція $g: C \rightarrow M$): Графік залежності тяги кожного двигуна від величини PWM-сигналу, це визначає нелінійність характеристики двигунів та оптимальний діапазон керування, рисунок 3.1.

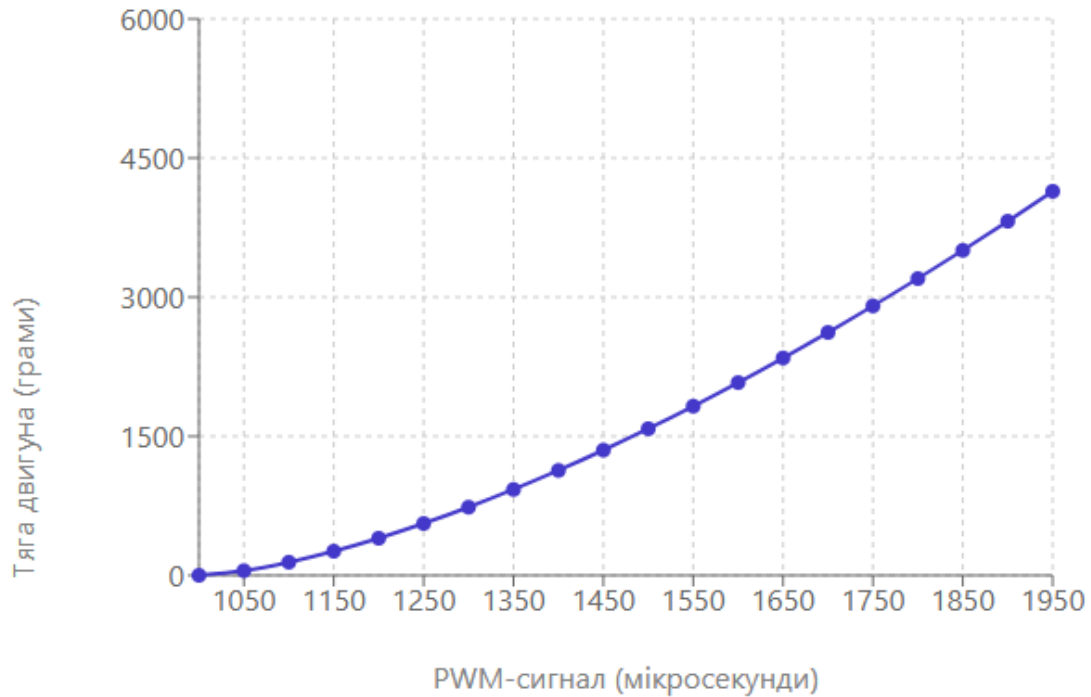


Рисунок 3.1 – Графік залежності тяги двигуна від PWM сигналу

Розглянемо детальніше залежність тяги двигуна від PWM сигналу:

- мінімум PWM (двигун вимкнено): 1000 мкс;
- середній діапазон: 1500 мкс;
- максимум PWM (повна тяга): 2000 мкс.

Залежність кутів орієнтації від тяги двигунів (функція $h: M \rightarrow O$): графіки залежності кутів тангажу, крену та рискання від різних комбінацій тяги двигунів, це дозволяє проаналізувати чутливість орієнтації дрона до змін тяги, рисунок 3.2.

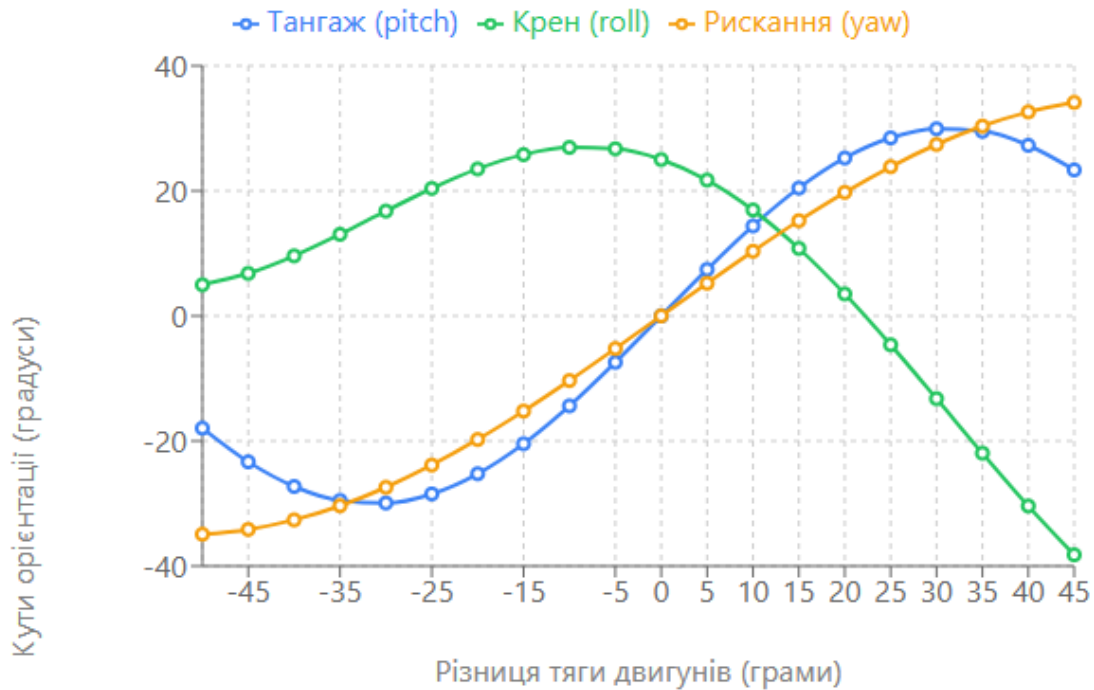


Рисунок 3.2 – Графік залежності кута орієнтації від різниці тяги двигуна

Розглянемо детальніше залежності кута орієнтації від різниці тяги двигуна:

- тангаж (синій) нахил вперед/назад;
- крен (зелений) нахил ліворуч/праворуч;
- рискання (жовтий) обертання навколо вертикальної осі.

На основі рисунку 3.2 можна зробити такі висновки, що діапазон контролю: різниця тяги двигунів: від -45 грам до +45 грам; кути орієнтації: від -40° до $+40^{\circ}$.

Що до особливості поведінки дрону, то при нульовій різниці тяги (0 грамів) усі кути близькі до 0° , що відповідає стабільному горизонтальному положенню при цьому тангаж має найбільшу лінійність у діапазоні ± 25 грам різниці тяги. В свою чергу крен демонструє нелінійну характеристику з максимумом при -15 грам. Ризик має найплавнішу характеристику з поступовим наростанням. Критичні точки:

- максимальний крен $+25^\circ$ при -15 грам різниці;
- максимальний тангаж $+30^\circ$ за $+35$ грам різниці;
- максимальне ризикування $+35^\circ$ за $+45$ грам різниці.

Таким чином, можна визначити рекомендації з управління:

- оптимальний діапазон управління ± 25 грам різниці тяги;
- слід уникати різниці тяги більше ± 45 грам для запобігання втраті керованості;
- PID-регулятор слід налаштовувати з урахуванням виявленої нелінійності характеристик.

В результаті можна зробити висновок що, дрон має передбачувану поведінку в діапазоні ± 25 грам різниці тяги та демонструє стабільне горизонтальне положення за нульової різниці тяги.

Що до характеристики управління то, система має нелінійний характер відгуку, особливо для крену. Найкраща керованість досягається в середньому діапазоні тяги.

Ризик має найбільш плавну характеристику, що полегшує точне керування.

Практичні рекомендації:

- оптимальний режим польоту: різниця тяги ± 25 грам;
- необхідне встановлення програмних обмежень для запобігання виходу за критичні значення;
- PID-регулятор вимагає налаштування з урахуванням нелінійності характеристик кожної осі окремо.

3.4 Охорона праці

Розробка математичної моделі FPV-дрона для контролю параметрів та створення програмного забезпечення пов'язана з низкою ризиків, які можуть впливати на безпеку працівників при роботі з цим обладнанням. Деякі з них включають:

– механічні травми бо при тестуванні FPV-дрону існує ризик механічних пошкоджень, спричинених рухомими частинами (наприклад, гвинтами). Для зменшення ризику необхідно використовувати захисні екрани, обмежувати доступ до зон тестування та обладнати робочі місця засобами безпеки. Забезпечення безпечної дистанції між працівниками та зоною польоту дрону;

– електробезпека бо робота з електричними компонентами дрону, такими як батареї та контролери, може призвести до ураження електричним струмом. Для запобігання таким інцидентам необхідно дотримуватись правил електробезпеки: використовувати ізоляційні матеріали, правильно заземлювати обладнання та встановлювати захисні пристрої. Перевірка справності електричних з'єднань перед кожним використанням;

– пожежна безпека бо використання акумуляторів високої ємності може призвести до пожежі. Необхідно зберігати акумулятори у спеціалізованих вогнетривких контейнерах та уникати їх перезарядження. Робоче місце має бути обладнане пожежними сигналізаціями, вогнегасниками та планами евакуації;

– навчання та свідомість працівників бо усі співробітники повинні пройти навчання з охорони праці, включаючи правила безпечного поводження з FPV-дроном, електричним обладнанням та засобами пожежогасіння. Регулярне проведення тренувань з евакуації та дій у разі аварійних ситуацій;

– радіобезпека де FPV-дрони працюють у діапазонах радіочастот, які можуть створювати перешкоди іншому устаткуванню. Важливо забезпечити відповідність радіочастотних пристроїв стандартам безпеки та уникати навантаження ефіру;

– ергономічні ризики бо тривала робота з FPV-дроном або джойстиком може призводити до втоми або дискомфорту. Робоче місце оператора має бути ергономічно спроектовано для мінімізації навантаження на опорно-руховий апарат.

3.5 Висновки до розділу 3

У ході роботи було розроблено математичну модель FPV-дрону для комп'ютеризованого управління його параметрами. Було визначено основні параметри, що впливають на динаміку польоту: позиція у тривимірному просторі, орієнтація (кут тангажу, крену, ролання), прискорення, швидкість та тяга двигунів.

Розроблена модель базується на фізичних законах і враховує взаємозв'язок між широтно-імпульсною модуляцією (PWM) сигналів, тягою моторів та орієнтацією дрону. Завдяки цим залежностям була проведена деталізація розрахунків руху дрону, визначення позицій, швидкостей, прискорень у просторі, а також механізмів стабілізації.

Ця модель дозволяє ефективно перетворювати вхідні сигнали з джойстиків у PWM-сигнали для керування двигунами, забезпечуючи стабільність і маневреність дрону в реальних умовах експлуатації. Таким чином, отримані результати є основою для розробки системи управління, яка відповідає сучасним вимогам точності та адаптивності [23].

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було розроблено математичну модель для комп'ютеризованого управління параметрами FPV-дрону, що дозволяє забезпечити точний контроль його польотних характеристик. У роботі виконано аналіз існуючих методів моделювання та управління FPV-дронами, визначено ключові параметри, що впливають на стабільність та керованість польоту. Основні результати, досягнуті під час виконання роботи:

- проаналізовано сучасний стан та тенденції розвитку FPV дронів;
- визначено основні параметри та характеристики FPV дронів;
- проаналізовано структуру системи керування FPV дроном;
- розроблено структуру FPV дрону;
- визначено параметри FPV дрону, що підлягають комп'ютеризованому управлінню – це параметри, що впливають на динамічну поведінку дрона (позиція, швидкість, прискорення, орієнтація, потяг двигунів тощо);
- розроблено математичну модель для комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрона, а саме, модель описує процес перетворення керуючих сигналів на механічну реакцію дрону;
- виконано розрахунки тяги, орієнтації та прискорення FPV дрону;
- виконано експериментальну частину, а саме, проведено дослідження параметрів управління FPV дроном.

Тож, розроблена 3D-модель FPV-дрона корисна для візуалізації дизайну та інженерного моделювання.

Запропонована математична модель є основою для створення ефективних алгоритмів управління FPV-дроном, що дозволить покращити його стабільність у польоті та маневреність. Ця модель також може бути

використана для тестування нових підходів до оптимізації польотних характеристик у симуляційних середовищах.

Основною науковою новизною роботи є розробка комплексної математичної моделі для комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрону, яка враховує всі ключові аспекти керування. Математична модель формалізує безліч всіх можливих станів дрону. Визначена цільова функція системи управління та обмеження. Модель в подальшому буде використовуватися як основа для розробки програмного забезпечення контролера польоту. Вона дозволяє проводити симуляції роботи дрону без реального апарату, що значно знижує ризики пошкоджень при тестуванні. Формалізовано системи функціональних залежностей для керування дроном, включаючи функції перетворення PWM в тягу двигунів (g), розрахунку кутів орієнтації (h), розрахунку прискорень (k), а також функції інтегрування для отримання швидкостей та позицій (v , p).

На основі проведеного тестування та побудованих графіків залежностей були отримані важливі результати щодо поведінки дрону. При аналізі залежності тяги двигуна від PWM сигналу встановлено основні робочі діапазони: мінімальне значення PWM складає 1000 мкс (двигун вимкнено), середній діапазон – 1500 мкс, а максимальне значення для повної тяги – 2000 мкс.

Дослідження залежності кутів орієнтації від різниці тяги двигунів виявило, що дрон демонструє передбачувану поведінку в діапазоні ± 25 г різниці тяги та забезпечує стабільне горизонтальне положення при нульовій різниці. Система має нелінійний характер відгуку, особливо для крену, а найкраща керованість досягається в середньому діапазоні тяги. Рискання характеризується найбільш плавною характеристикою, що забезпечує точність керування.

Були визначені критичні точки керування: максимальний крен досягає $+25^\circ$ при -15 г різниці тяги, максимальний тангаж становить $+30^\circ$ при $+35$ г різниці, а максимальне рискання складає $+35^\circ$ при $+45$ г різниці. На основі цих даних сформульовані практичні рекомендації: оптимальний режим

польоту слід підтримувати в межах різниці тяги ± 25 г, необхідно встановлювати програмні обмеження для запобігання виходу за критичні значення, а PID-регулятор потребує окремого налаштування для кожної осі з урахуванням виявлених нелінійних характеристик.

Отримані результати роботи сприяють подальшому розвитку технологій управління FPV-дронами, зокрема, у сферах автоматизації, транспортування, моніторингу та відеозйомки. Унікальність моделі полягає в її здатності враховувати комплексні взаємодії між параметрами польоту, що забезпечує більш точне та надійне керування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.
3. Невлюдов І. Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.
4. Макушев І.А. Огляд та актуальність сучасних повітряних дронів / І.А. Макушев // Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2024 Part 1) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – Вип. 1. – Р. 133-137.
5. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.
6. Sotnik S. V. Safe cobots in development of industrial robotics : дис. / S. V. Sotnik, Y. S. Usenko, P. V. Shakhov // The 8th International scientific and practical conference “European scientific congress” (September 4-6, 2023). – Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. – 2023. – Р. 80-84.
7. Сотник С. В. Огляд базових елементів автоматизованої системи контролю навколишнього середовища портативної ділянки зеленого побуту /

С. В. Сотник, Ф. В. Кирпота // Автоматизація, електроніка та робототехніка (AERT-2023). – 2023. – Р. 80-84.

8. Sotnik S. V. Development of remote control for thermoplastics dosing automation system / S. V. Sotnik, V. V. Trokhin, D. O. Tereshchuk // The 5th International scientific and practical conference “Topical aspects of modern scientific research” (January 25-27, 2024) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. – 2024. – P. 179-184.

9. Sotnik S. V. Design features of control panels and consoles in automation systems / S. V. Sotnik, K. S. Redkin // 9th International scientific and practical conference “Science and innovation «AUTOMATION AND DEVELOPMENT OF ELECTRONIC DEVICES» ADED-2024 Part 1. 137 of modern world” (May 18-20, 2023) Cognum Publishing House, London, United Kingdom. – 2023. – P. 201-205.

10. Сотник С. В., Аналіз систем автоматизації визначення умов у житлових та робочих приміщеннях з використанням комп'ютерно-інтегрованих рішень / С. В. Сотник, Я. І. Халімонов // Automation, electronics and robotics (AERT-2023). – 2023. – Р. 32-35.

11. Sotnik S. V. Analysis of design process of automated fire protection system / S. V. Sotnik, Y. R. Vasylychenko // Automation, electronics and robotics (AERT-2023). – 2023. – P. 59-62.

12. Sotnik S. Analysis of Existing Influences in Formation of Mobile Robots Trajectory / S. Sotnik, V. Lyashenko // International Journal of Academic Information Systems Research (IJASIR). – 2022. – Vol. 6, Issue 1 – P. 32-35.

13. Макушев І.А. Огляд сучасних роботів-маніпуляторів / І.А. Макушев // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Р. 82 – 86.

14. Zarubin, I. Basic principles of building aerial robots/ I. Zarubin, S. Sotnik // Manufacturing & Mechatronic Systems 2024: Proceedings of VIII st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2024, pp. 32-36.

15. Зарубін І. С. Огляд сучасних повітряних роботів / І. С. Зарубін // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2024) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків: ХНУРЕ, 2024. – Вип. 1. – С. 144-149.

16. Turpin, M. Decentralized Formation Control with Variable Shapes for Aerial Robots / M. Turpin, N. Michael, V. Kumar // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – St. Paul, Minnesota, USA. – 2012. – P. 23-30.

17. Mahony, R. Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control of Quadrotor / R. Mahony, V. Kumar, P. Corke // IEEE Robotics & Automation Magazine. – Vol. 19, Issue 3. – 2012. – P. 20-32.

18. Bristeau, P. J. The Navigation and Control Technology Inside the AR. Drone Micro-UAV / P. J. Bristeau, F. Callou, D. Vissière, N. Petit // IFAC Proceedings Volumes. – Vol. 44, Issue 1. – 2011. – P. 1478-1479.

19. Schmitz, A. Design of a Reconfigurable Crop Scouting Vehicle for Row Crop Navigation: A Proof-of-Concept Study / A. Schmitz, C. Badgujar, H. Mansur, D. Flippo, B. McCornack, A. Sharda // Sensors. – Vol. 22, Issue 16. – 2022. – P. 6203-6216.

20. Process Sensing Technologies. Moisture Sensing Technologies / Process Sensing Technologies // Process Sensing Technologies. – URL: <https://www.processsensing.com/en-us/technologies/moisture-sensing-technologies/>

21. Princy A. J. Humidity Sensor: A Widely Used Electronic Device in Several Industries / A.J. Princy // Research Dive. — 2023. — Том 12, № 5. — С. 45–47.

22. KPM Analytics. Online NIR Moisture Measurement for Industrial Applications / KPM Analytics. — URL: <https://www.kpmanalytics.com>
23. Стиценко Т.Є., Пронюк Г.В., Сердюк Н.М., Хондак І.І. «Безпека життєдіяльності»: навч. посібник / Т.Є Стиценко, Г.В. Пронюк, Н.М. Сердюк, І.І. Хондак. – Харків: ХНУРЕ, 2018. - 336 с.