



# Звіт про оригінальність

● Оцінка схожості

% 34

● Ризик плагіату

НАЙВИЩИЙ

👤 Ігор Кагало 🕒 2025-06-03 12:06

Посилання на звіт: ZKY0 / Посилання користувача: qfC8



# Ось вона – Ваша звіт про оригінальність!

Ми раді повідомити, що перевірка вашого документа завершена, і результати вже готові! Наші алгоритми старанно працювали, щоб знайти збіги в наших базах даних.

На наступних сторінках ви знайдете результати перевірки:

---

Бали

---

Збіги

---

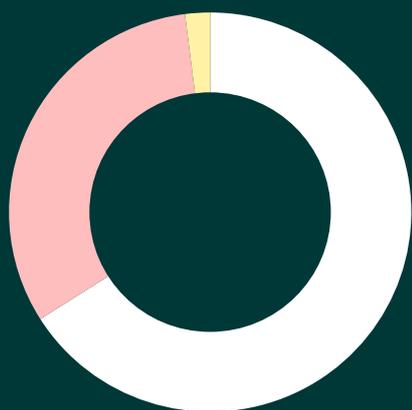
Посилання

---

Ваш документ було перевірено за такими джерелами:

- База даних інтернет-джерел
- База даних наукових статей
- Глибока перевірка (наш вдосконалений алгоритм)

# Бали



● Збіги тексту	32%
● Перефразування	2%
● Цитований текст	0%
● Неправильне цитування	0%
● Збігів не знайдено	66%

## Ризик плагіату

НАЙВИЩИЙ

Ризик плагіату вказує, як збіги тексту розподілені по документу. Вищий ризик виникає, коли збіги з'являються близько один до одного, наприклад, у тому самому абзаці або розділі.

## Оцінка схожості

Оцінка схожості показує, скільки слів або символів у вашому документі збігаються з текстами інших документів, включаючи перефразовані тексти або неправильні цитати.

% 34

# Збіги

---

## ВСТУП

Сучасний світ стрімко рухається в напрямку автоматизації, дистанційного керування та безпілотних технологій, серед яких **23** особливе місце займають безпілотні літальні апарати (БПЛА), зокрема FPV-дрони (First Person View). Ці пристрої знаходять широке застосування в різних сферах: від розваг і відеозйомки до пошуково-рятувальних операцій, інспекцій важкодоступних об'єктів, сільського господарства, а також у наукових дослідженнях [1]. Ключовим елементом FPV-дрона, що забезпечує стабільність, керованість та взаємодію з пілотом або автопілотом, є польотний контролер.

Польотний контролер — це центральний модуль, який приймає дані з різноманітних сенсорів (акселерометрів, гіроскопів, барометрів, GPS) і **19** на їх основі формує сигнали для управління двигунами та стабілізації польоту. Якісне проектування цього елемента має вирішальне значення для надійності та ефективності роботи дрона, особливо в умовах складного рельєфу або при виконанні точних маневрів.

Актуальність теми зумовлена потребою в адаптивних, енергоефективних і високотехнологічних рішеннях у сфері керування БПЛА. Проектування власного польотного контролера **19** дає змогу глибше зрозуміти принципи побудови систем керування, вдосконалити навички роботи з мікроконтролерами, сенсорними модулями, алгоритмами фільтрації даних та стабілізації.

Метою цієї дипломної роботи є розробка та проектування функціонального польотного контролера для FPV-дрона з урахуванням особливостей конструкції, вимог до точності керування та умов експлуатації. У процесі роботи буде проаналізовано існуючі архітектури польотних контролерів, обґрунтовано вибір апаратної платформи, реалізовано програмну частину з базовим алгоритмом стабілізації та перевірено працездатність системи на практиці.

Таким чином, дана тема є не лише актуальною з технічної точки зору, але й сприяє розвитку практичних навичок у галузі електроніки, програмування та системного проектування.

# 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДРОНІВ

## 1.1 Типи дронів

5 Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – повітряне судно, призначене для виконання польоту без пілота на борту, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються відповідною програмою або за допомогою спеціальної станції керування, що знаходиться по за повітряним судном.

5 Безпілотний авіаційний комплекс (безпілотна авіаційна система) – безпілотне повітряне судно, пов'язані з ним пункти дистанційного пілотування (станції наземного керування), необхідні лінії керування і контролю та інші елементи, вказані в затвердженому проєкті типу цього комплексу. Цей комплекс може охоплювати кілька безпілотних літальних апаратів. На рис.1.1 представлений приклад безпілотного авіаційного комплексу.

Рисунок 1.1 – Приклад безпілотного авіаційного комплексу

5 «Безпілотник», «БПЛА», «UAV» (від англ. unmanned aerial vehicle) – це літальний апарат, яким керує один або кілька пілотів за допомогою каналів зв'язку.

5 Їх можна класифікувати відповідно до:

5 Типів системи керування;

5 Ваги;

5 Масштабу завдань;

5 Паливної системи;

5 Типу крила;

5 Тривалості польоту;

5 Практичної «стелі» польоту;

5 Типу літального апарату;

5 Базування;

5 Правил польотів;

5 Кількості застосувань;

5 Типу паливного бака;

- 5 Радіусу дії;
- 5 Максимальної швидкості польоту;
- 5 Кількості двигунів;
- 5 Використання;
- 5 Напрямку підйому/посадки;
- 5 Типу підйому/посадки;
- 5 Часу отримання зібраної інформації.
- 5 Ми розглянемо дві всесвітньо відомі класифікації:
- 5 Міжнародної асоціації з безпілотних літальних систем, UVSI;
- 5 НАТО.
- 5 Класифікація Міжнародної асоціації з безпілотних літальних систем, UVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International) розрізняє БПЛА відповідно до:
- 5 Льотної маси;
- 5 Тривалості польоту;
- 5 Дальності польоту;
- 5 Висоти польоту;
- 5 Галузі використання.
- 5 В таблиці 1.1 наведено класифікацію БПЛА за стандартом USVI.

22 Таблиця 1.1 – 5 Класифікація БПЛА за стандартом 5 USVI

Група

Категорія

22 Льотна 22 маса [кг]

22 Дальність польоту 16 [км]

16 Висота польоту [м]

22 Тривалість польоту [год]

5 Малі БПЛА

5 Нано БПЛА

5 < 0,025

< 1

100

< 0,5

Мікро БПЛА

< 5

< 10

250

1

Міні БПЛА

20 - 150

< 30

150 - 300

< 2

5 Тактичні

5 Легкі БПЛА для контролю переднього краю оборони

5 25 - 150

10 - 30

3000

2 - 4

5 Легкі БПЛА з малою дальністю польоту

5 50 - 250

30 - 70

3000

3 - 6

Середні БПЛА

150 - 500

70 - 200

5000

6 - 10

5 Середні БПЛА за великою тривалістю 16 польоту

16 500 - 1500

> 500

8000

10 - 18

5 Мало висотні БПЛА для проникнення вглиб оборони супротивника

5 250 - 2500

> 250

50 - 9000

0,5 - 1

5 Мало висотні БПЛА з високою 16 тривалістю польоту

16 15 - 25

16 > 16 500

3000

> 24

**5 Середньовисотні БПЛА з великою дальністю польоту**

**5** 1000 - 500

**5** > 500

5000 - 8000

24 - 48

**5 Висотні БПЛА з великою дальністю польоту**

**5** 2500 - 5000

> 2000

20000

24 - 48

Стратегічні

**5 Бойові БПЛА (Ударні)**

**5** > **5** 1000

1500

12000

2

**16 БПЛА оснащені бойовою частиною летальної **5** дії**

**5** 150 - 1000

300

4000

3 - 4

**16 БПЛА – хибні цілі**

**16** 150 - 500

0 - 500

50 - 5000

< 4

Спеціального призначення

Стратосферні БПЛА

> 2500

> 2000

> 20000

> 48

Екзостратосферні БПЛА

> 2500

> 2000

> 30500

> 48

6 Відповідно до льотної маси виділяють наступні 5 БПЛА:

6 Мікро БПЛА (Micro UAS), вагою до 1 кг;

6 Малий БПЛА (Small UAS) – від 1 до 25 кг;

6 Середній БПЛА (Medium UAS) – від 25 до 150 кг;

6 Великий БПЛА (Large UAS) – понад 150 кг.

6 За призначенням розрізняють такі 6 БПЛА:

6 Комерційні БПЛА, що застосовуються з метою отримання прибутку, зокрема в агрокультурі, при відеозніманні, геологічних дослідженнях тощо;

6 Військові БПЛА, призначені для військових операцій, розвідки, підтримки, виконання завдань зв'язку тощо;

6 Громадські БПЛА для цивільних цілей, таких як пошук і порятунок, моніторинг

довкілля, наукові дослідження тощо.

6 За дальністю і тривалістю польоту БПЛА характеризують як:

6 Короткотермінові (Short-Endurance) – з дальністю і тривалістю польоту до години;

6 Середньотермінові (Medium-Endurance) – від однієї до кількох годин;

6 Довготермінові (Long-Endurance) БПЛА – дальність і тривалість польоту яких понад кілька годин (до кількох десятків).

6 БПЛА можна класифікувати за таким додатковим критерієм як 2 тип приводу:

2 Електричні БПЛА – потребують електричного джерела живлення для руху;

2 БПЛА з паливними елементами (Hybrid UAS) використовують і електричні, й паливні системи живлення;

2 БПЛА з паливом (Internal Combustion Engine UAS), що рухаються за допомогою двигуна внутрішнього згорання.

2 Відповідно до стандарту НАТО (STANAG 4670), військові БПЛА поділяються на три класи та сім категорій, залежно від висоти польоту та радіусу дії. Класифікація БПЛА за стандартом НАТО наведена в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – 2 Класифікація БПЛА за стандартом НАТО

Клас

Категорія

Рівень

військових дій

Висота застосування

2 Радіус дії

2 Приклад платформи

2 Клас 2 I

2 Мікро

2 Підрозділ

- 2 До 60 м
- 2 До 5 км
- 2 Black Widow
- 2 Міні
- 2 Підрозділ
- 2 До 900 м
- 2 До 25 км
- 2 Skylark
- 2 Малі
- 2 Формування
- 2 До 1500 м
- 2 До 50 км
- 2 Scan Eagle, PD-2
- 2 Клас 2 II
- 2 Тактичні
- 2 Тактичний
- 2 До 5500 м
- 2 До 200 км
- 2 Hermes 450
- 2 Клас III
- 2 MALE
- 2 Оперативний
- 2 До 14000 м
- 2 Необмежений

Bayraktar TB-2

2 HALE

2 Стратегічний

2 До 20000 2 м

Необмежений

2 Global Hawk

2 Ударні

2 Стратегічний

2 До 20000 2 м

Необмежений

2 Reaper

2 До класу I належать БПЛА трьох категорій, вагою до 150 кг, а саме: малі БПЛА, міні БПЛА і мікро БПЛА.

2 Малі БПЛА, що важать понад 15 кг. Їх використовують у батальйонах та полках на висоті до 5000 футів (1500 метрів), радіус дії малих БПЛА – 50 км. Це, наприклад, Scan Eagle, вага якого 18 кг, корисне навантаження до 6 кг, швидкість 140 км/год, дальність польоту – до 100 км.

2 Міні БПЛА до 15 кг для рот, взводів, відділень. Їх висота польоту – до 3000 футів (914 метрів), радіус дії – до 25 км. До прикладу, Skylark, вагою – 7,5 кг, корисне навантаження – 1,1 кг, радіус дії – 20-40 км.

2 Мікро – надлегкі БПЛА для взводів, відділень, персонального використання. Їх висота польоту – до 200 футів (61 метр), радіус дії – до 5 км. Як-от, Black Hornet Nano, вагою 18 грамів, що розвиває швидкість до 5 м/с з радіусом дії до 1 км.

2 Клас II – це тактичні БПЛА, вагою 150-600 кг. Їх використовують у підрозділах бригадного рівня. Висота польоту таких БПЛА до 18 000 футів (5500 метрів), радіус дії – до 200 км. Це, наприклад, Hermes 450, вагою до 450 кг, із корисним навантаженням до 150 кг, радіусом дії – 200 км.

2 Клас III – це БПЛА, вагою понад 600 кг. Їх поділяють на три підтипи, залежно від використання в стратегічному та оперативному театрах бойових дій:

2 MALE (médium-altitude long-endurance) – тривало-баражуючі БПЛА, які сягають висоти до 45 000 футів (13716 метрів), довгої тривалості польоту, необмеженого радіуса дії. Наприклад, Heron з вагою до 1150 кг, швидкістю – до 240 км/год, висотою польоту 30019 футів (9150 м), радіусом дії – 1000 км;

2 HALE (High-altitude long-endurance) – тривало-баражувальні БПЛА, що працюють на висоті до 65 000 футів (19812 метрів), довгої тривалості польоту, необмеженого радіуса дії. Як-от Global Hawk, вагою до 12 000 кг, його корисне навантаження – 900 кг, швидкість – до 645 км/год, дальність польоту – 25 000 км, тривалість роботи – 36 годин;

2 Ударні БПЛА великої висоти застосування (20 000 метрів) із необмеженим радіусом дії. Їх вага до 4760 кг, корисне навантаження – до 1700 кг, максимальна швидкість – 400 км/год, дальність польоту – 6000 км, тривалість роботи – 24 години.

2 За конструкцією БПЛА поділяються на 5 основних категорій.

2 Перша 2 категорія – це 2 літаки (Fixed-Wing), серед яких:

2 Моноплани (Monoplanes) – оснащені одним крилом;

2 Біплани (Biplanes) – з двома крилами – верхнім та нижнім;

2 Триплани (Triplanes) – з трьома крилами, розташованими одне над іншим;

2 Крила (Wings) у формі дельти.

2 Друга 2 категорія – це 2 мультироторні (Multicopter) БПЛА, до яких відносяться:

2 Квадрокоптери (Quadcopters) із чотирма роторами;

2 Гексакоптери (Hexacopters) з шістьма роторами;

2 Октокоптери (Octocopters), оснащені вісьмома роторами.

2 Третя 2 категорія це – 2 тейлсіттери із крилами та мультироторами, для об'єднання переваг обох конструкцій.

2 Четверта 2 категорія це – 2 VTOL, серед яких БПЛА, що можуть здійснювати вертикальний зліт і посадку, а потім працювати в 14 горизонтальному режимі польоту.

14 П'ята 14 категорія це – 14 Аеростати та дирижаблі (Airships) – надлегкі апарати, які працюють завдяки силам повітря і можуть мати газовий балон для підйому.

## 14 1.2 Дрони коптерного типу

Відповідно до кількості пропелерів мультироторні системи можна поділити 8 типів.

Перший тип, це – бікоптер, він 9 оснащений двома двигунами, що 9 рухаються 9 за допомогою сервоприводу.

9 Другий тип, це – тандем коптер в якому два пропелери розташовані в лінію один за одним. Ця конфігурація дозволяє виконувати маневри та обертатися навколо вертикальної осі.

Третій тип, це – трикоптер, він відповідно до своєї назви, оснащений 9 трьома двигунами. При цьому два із них жорстко зафіксовані на рамі, третій керується сервомашинкою. Нахилиючи рухомий двигун, коптер може змінювати вектор польоту. Така архітектура стабільніша за бікоптер, проте все ще важко переносить вітер.

9 Три пропелери розташовані на власних гвинтових валах, що дозволяє керувати та змінювати напрямок польоту, регулюючи швидкість обертання.

Четвертий тип, це – квадрокоптер. Найбільш стабільний із розглянутих 9 мультироторних систем. Чотири точки двигунів забезпечують кращий контроль над системою. На рис. 1.2 представлено конфігурацію обертання пропелерів квадрокоптера.

Кожен пропелер розташований на власному гвинтовому валу у кутах квадрата (або прямокутника). Коли швидкості обертання змішуються, дрон злітає. Має хорошу стабільність, що часто порушується у разі вітру. Зазвичай має 4 або більше пропелерів для зліту та посадки і фіксовані крила для польоту на великій відстані.

Рисунок 1.2 – Конфігурація обертання пропелерів квадрокоптера

П'ятий тип, це – пентакоптер який має п'ять пропелерів, що розташовані навколо центрального корпусу. Ця конфігурація надає хорошу стабільність та забезпечує виживання при втраті одного пропелера.

Шостий тип, це – гексакоптер. В нього є шість пропелерів, які розташовані навколо центрального корпусу задля стабільності й можливості продовженого польоту в разі втрати одного пропелера.

Сьомий тип, це – октокоптер він має 8 пропелерів. Восьмий пропелер може бути розташований вертикально в центрі або горизонтально зверху конструкції. Це дозволяє забезпечити ще кращу стабільність і надійність.

Восьмий тип, це - конфігурація Y6. Конструкція Y6 – це тип гексакоптера, в основі якого

не шість променів, а три, кожен з яких з'єднаний з парою моторів (всього 6 моторів), де нижні пропелери проєктують тягу вниз. На рис. 1.3 представлено конфігурацію обертання пропелерів дрона Y6.

Перевага такої конструкції в тому, що вона має найменшу кількість елементів порівняно з гексакоптером, а також підіймає більше корисного навантаження порівняно з квадрокоптером.

Рисунок 1.3 – Конфігурація обертання пропелерів дрона Y6

Під час використання гвинтів із зустрічним обертаннями уникається гіроскопічний ефект, як у Y3, також у разі відмови одного з моторів дрон, швидше за все, зможе здійснити м'яку посадку, а не розбитися.

Але конструкція Y6 також має певні недоліки. Він дорожчий, порівняно з квадрокоптером, через використання додаткових деталей, що коштують так само як деталі гексакоптера.

Додаткові мотори та деталі збільшують вагу коптера, тож, щоб отримати аналогічний час польоту, що й у квадрокоптера, необхідно скористатися АКБ більшої ємності.

Як показує практика, тяга, отримана на Y6, трохи нижча, ніж у звичайного гексакоптера, ймовірно тому, що нижній гвинт впливає на тягу верхнього гвинта. Не всі польотні контролери підтримують таку конфігурацію. Стандартна рама квадрокоптера складається з:

Нижнього дека;

Променів;

Верхнього дека;

Захисту моторів та обладнання;

Кріплення для камери та батареї.

На рис. 1.4 представлений вигляд рами квадрокоптера.

Рисунок 1.4 – Вигляд рами квадрокоптера

### 1.3 Дрони типу «крило»

Підйомна сила БПЛА з жорстким крилом створюється аеродинамічним способом шляхом натиску зустрічного повітря на нерухоме крило.

Апарати такого типу, зазвичай, вирізняються:

Високою тривалістю польоту;

Значною максимальною висотою польоту;

Швидкістю;

Меншою залежністю від погодних умов.

Відстань, яку пролітає **7** БПЛА найпростішого класу до «поля бою», у разі перевершує робочі дистанції коптерних систем.

**7** Проте **7** відомі **7** недоліки літакового БПЛА:

**7** Необхідність майданчика для зльоту та посадки;

**7** Тривалий час на розгортання та підготовку до вильоту;

**7** Складніше **7** керування;

**7** Вимогливість до підготовки екіпажу.

**7** Такі **7** БПЛА використовуються для аерофотознімання **7** в денний та нічний час, а за необхідних **7** навичок **7** екіпажу – для коригування артилерійського вогню.

**7** Відомі БПЛА, призначені для виконання завдань РЕР, РЕБ та забезпечення зв'язку. Швидкісний діапазон їх роботи – від 15 до 30 м/с.

Робочі висоти БПЛА літакового типу залежать **7** від обладнання та розмірів апарату, але завжди перевищують 300 м. Зазвичай це діапазон висот від **7** 300 до **7** 2000 м.

**7** Існує кілька аеродинамічних конструкцій літакових БПЛА. Основні конструкції це – класична конструкція та конструкція «летюче крило». На рисунку 1.5 наведено приклад БПЛА класичної конструкції.

Рисунок 1.5 – Приклад БПЛА класичної конструкції

На рисунку 1.6 наведено приклад БПЛА конструкції «летюче крило».

Рисунок 1.6 – Приклад БПЛА конструкції «летюче крило»

Літак складається з шести елементів. Це – крило, силова установка, шасі, хвостове оперення, фюзеляж, електроніка керування. Розгляньмо їх по черзі. Крило в авіаційній техніці – поверхня для створення піднімної сили. Принцип його дії такий.

При обтіканні крила потоком повітря відбувається збурення, 7 що призводить до відхилення повітря потоку вниз. Згідно 3 закону збереження імпульсу виникає підйомна сила, спрямована в протилежний бік, тобто, вгору.

Зазвичай 15 крило літака складається з центропланової частини, консолей (лівої та правої) і механізації крила. Також крило можна розділити на дві частини, ліве і праве напівкрило. На рис. 1.7 представлений вигляд механізації крила.

Рисунок 1.7 – Вигляд механізації крила

3 Вінглети (закінцівки крила) – невеликі додаткові елементи на кінцях крил літака у вигляді крилець або плоских шайб. Вони слугують для збільшення ефективного розмаху крила.

3 Через різницю тисків частина повітря переміщується 3 за 3 край крила з частини 3 з високим тиском знизу до 3 зниженого тиску зверху, та 3 утворює 3 кінцевий вихор. На утворення вихору витрачається енергія руху, що створює 3 силу індуктивного опору. Через 3 кінцевий вихор також перерозподіляється 3 піднімна сила 3 за розмахом крила, зменшуючи його ефективну площу і подовження, і знижуючи аеродинамічну якість. Вінглет 3 знижує цей індуктивний опір, 3 і, як наслідок, збільшує 3 піднімну силу 3 на кінці крила. Також вінглети дозволяють збільшити подовження крила, майже без 3 змін його розмаху, 3 поліпшити паливну економічність у літаків або дальність польоту планерів, домогтися кращого розподілу піднімної сили. Нині однакові 3 типи літаків можуть мати різні вінглети.

3 Елерони – аеродинамічні елементи 3 керування, 3 симетрично розташовані на задній крайці консолей крила у літаків нормальної конструкції та літаків-«качок». Вони призначені, перш за все, для регулювання кута 3 крену літака. При цьому елерони відхиляються диференційно, тобто в протилежні сторони: для крену літака праворуч правий елерон повертається вгору, а лівий – вниз, і навпаки. Принцип дії елеронів полягає в тому, що у крила з піднятим вгору елероном піднімна сила зменшується, а у крила з опущеним елероном піднімна сила збільшується. Створюється момент сили, що веде до обертання літака навколо осі крену.

3 Елевони – гібрид елеронів і керма висоти. Вони виконують роль елеронів під 3 час регулювання кута 3 крену літака, і керма висоти – при регулюванні кута тангажу. Елевони використовуються 3 на літаках без горизонтального хвостового оперення, що мають зазвичай схему типу «безхвостка» 3 або «летюче 3 крило». Для управління кутом крену літака елевони відхиляються диференційно. Для крену літака праворуч правий елевон повертається вгору, а лівий – вниз, і навпаки. Синфазне відхилення елевонів дозволяє керувати кутом тангажу літака в горизонтальному польоті, для його збільшення при горизонтальному польоті обидва елевони підіймаються 3 вгору.

3 Передкрилки – поверхні, що відхиляються, встановлені на передній крайці крила. При відхиленні вони утворюють щілину, таку ж, як і щілини закрилків. Як правило, передкрилки автоматично відхиляються одночасно з закрилками, але можуть регулюватися незалежно.

Загалом передкрилки допомагають збільшити допустимий кут 3 атаки. Тобто зрив потоку з верхньої поверхні крила відбувається при більшому куті 3 атаки. Крім простих, існують так звані адаптивні передкрилки – 3 вони 3 автоматично відхиляються для забезпечення оптимальних аеродинамічних характеристик крила впродовж усього польоту.

3 Закрилки – поверхні, що відхиляються, симетрично розташовані на задній крайці крила. Закрилки в прибраному стані - 3 це продовження 3 поверхні крила, тоді як у випущеному можуть відходити від нього з утворенням щілин. Використовуються для поліпшення опорної 3 здатності 3 крила 7 під час зльоту, набору 3 висоти, зниження і посадки, при польоті на незначних швидкостях.

3 Флаперони – елерони, які можуть функціонувати 3 як закрилки при 3 синфазному відхиленні вниз. Широко застосовуються в надлегких літаках і радіокерованих авіамоделях при польотах на малих швидкостях, а також при зльоті та посадці. Іноді застосовуються на важчих 3 літаках (наприклад, Су-27). 3 Основна перевага флаперонів – простота 3 реалізації відповідно до наявних 3 елеронів.

3 Інтерцептори (спойлери) – пластини, розташовані на поверхні крила літака, що висуюються чи відхиляються назовні для того, щоб зірвати потік повітря. Це збільшує аеродинамічний опір і зменшує підйомну силу. Тому інтерцептори також називають елементами безпосереднього керування підйомною силою.

Важливо розрізнити 3 інтерцептори з повітряними гальмами. Інтерцептори також активно використовуються для гасіння підйомної сили після приземлення або при перерваному зльоті й для збільшення опору. Зауважте, що вони не стільки безпосередньо 3 зменшують швидкість, скільки 3 підйомну силу крила. 7 Це призводить до збільшення 3 навантаження на колеса і поліпшення їх 3 зчеплення 3 з поверхнею. Завдяки цьому, після випуску внутрішніх інтерцепторів 3 можна розпочинати 3 гальмування за допомогою коліс.

3 Другий елемент літака це – силова установка. Залежно від завдань використовують ДВЗ або електродвигуни. 11 Застосування електродвигунів на БПЛА зумовлено 11 низкою причин.

11 У сучасних електродвигунів високий коефіцієнт корисної дії. При 11 застосуванні безколекторного двигуна він 11 фактично може досягати 95%. 11 Також

11 електродвигуни важать значно менше, ніж аналогічні за характеристиками двигуни внутрішнього згоряння.

11 Наступний елемент літака це – шасі. Шасі 3 літального апарату – система опор літального апарату, що забезпечує його стояння, пересування аеродромом або по воді при зльоті та посадці. Зазвичай це кілька коліс, іноді - лижі або поплавці. У деяких випадках можливі гусениці або поплавці, суміщені з колесами.

Четвертий елемент літака – хвостове оперення. 3 Це аеродинамічні поверхні, що забезпечують стійкість, керованість і балансування літака в польоті. Оперення 3 утворюється горизонтальним і вертикальним.

3 Основні вимоги до оперення це 3 – 3 забезпечення високої ефективності при мінімальному лобовому опорі та 3 найменшій вазі конструкції мінімальне 3 затінення оперення іншими елементами літака – крилом, фюзеляжем, гондолами двигунів, а також однієї частини оперення іншим, відсутність вібрацій і коливань, пізніший, ніж на крилі, розвиток хвильової кризи.

3 Горизонтальне оперення забезпечує 3 повздожню 3 стійкість, керованість і балансування. Воно складається з нерухомої поверхні (стабілізатора) і шарнірно підвішеного до нього керма висоти.

3 Вертикальне оперення забезпечує літаку шляхову стійкість, керованість і балансування по 3 вертикальній 3 осі. Воно складається з нерухомої поверхні (кіля) 3 і напряду 3 шарнірно підвішеного до нього керма.

3 Далі розгляньмо фюзеляж, або 12 корпус літального апарату, основу 12 його конструкції. Він пов'язує 12 крила, оперення та (іноді) шасі. Фюзеляж літака призначений для перебування екіпажу, устаткування та корисного навантаження. У фюзеляжі може розміщуватися паливо, шасі, двигуни.

12 Останній елемент літака – електроніка керування. Вона містить польотні контролери, радіоприймачі, датчики та модулі, а саме:

Польотний контролер;

Плату розподілення напруги;

Сервопривід;

Датчики систем сповіщення;

Відео систему.

## 1.4 Области застосування дронів

Однією з найдинамічніших галузей використання дронів є агросектор. БПЛА активно **7** застосовуються для аерофотозйомки полів, моніторингу стану посівів, виявлення шкідників і хвороб рослин, **18** а також для картографування земельних угідь. Завдяки мультиспектральним камерам фермери можуть оперативнo отримувати дані про стан вегетації, вологість ґрунту, необхідність внесення добрив або поливу. Крім того, дрони використовуються для точкового розпилення засобів захисту рослин, що значно економить ресурси та зменшує навантаження на екосистему.

У сфері енергетики БПЛА застосовуються для інспекції високовольтних ліній електропередач, вітроелектростанцій, сонячних панелей, нафтових і газових трубопроводів. Завдяки використанню дронів значно зменшується потреба у ручному огляді об'єктів, що може бути небезпечним або трудомістким. Безпілотники дозволяють швидко виявити пошкодження, перегрів, витоки або інші несправності, що покращує оперативність реагування та знижує ризик аварій.

БПЛА стали незамінним інструментом для геодезистів і топографів. За допомогою високоточних камер і систем позиціонування дрони дозволяють створювати ортофотоплани, цифрові моделі місцевості, карти висот, аналізувати рельєф. Така технологія значно пришвидшує процес збирання геоданих і знижує витрати в порівнянні з традиційними методами. Особливо ефективно застосування дронів у гірських або важкодоступних районах.

**18** Дрони відіграють важливу роль у моніторингу навколишнього середовища. Вони використовуються для контролю за лісами, виявлення незаконних вирубок, спостереження за популяцією диких тварин, контролю якості води в річках і озерах. У зонах природних катастроф БПЛА допомагають оцінити масштаби забруднення, пошкодження територій або інфраструктури. Також вони застосовуються для розповсюдження насіння з метою відновлення лісів після пожеж.

У ситуаціях надзвичайного стану дрони забезпечують швидкий доступ до зон, які є недоступними або небезпечними для рятувальників. Завдяки камерам, тепловізорам та датчикам руху, БПЛА допомагають виявити людей під завалами, на водоймах, у горах або в лісах. Вони також можуть доставляти медикаменти, воду, зв'язок або інші критично важливі ресурси постраждалим у важкодоступні місця.

Історично БПЛА були вперше розроблені для військових потреб, і до сьогодні вони залишаються важливим інструментом для спостереження, розвідки, коригування артилерійського вогню, а також як ударні платформи. Сучасні дрони можуть працювати автономно, мати функції штучного інтелекту та забезпечувати високоточне ураження

цілей при мінімальних людських втручаннях.

У будівельній галузі БПЛА використовуються для моніторингу ходу будівництва, контролю за технікою безпеки, 3D-моделювання споруд, обстеження дахів та фасадів. Дрони допомагають оптимізувати планування об'єкта, швидко виявити відхилення від проєкту, а також вести фото- або відеодокументацію всіх етапів будівництва.

У мас-медіа дрони надають нові можливості для створення унікального візуального контенту. Аерозйомка дозволяє отримати видовищні кадри з висоти, **7** що особливо важливо під час висвітлення подій, протестів, стихійних лих або масових зібрань. Також дрони широко використовуються у кіновиробництві, рекламній індустрії та документальних фільмах.

Провідні компанії, такі як Amazon, UPS та інші, активно тестують системи доставки товарів за допомогою дронів. Безпілотники здатні швидко транспортувати невеликі вантажі без необхідності втручання людини. У майбутньому це може стати ефективним рішенням для доставки товарів у сільські райони, а також для екстреної доставки медикаментів або крові.

### 1.5 Особливості FPV-дронів

FPV-дрони (First Person View — вид від першої особи) є особливим різновидом **7** безпілотних літальних апаратів, основною характеристикою яких є можливість керування в режимі реального часу через відео трансляцію з камери, встановленої на борту дрона. Це створює ефект «присутності» пілота у повітрі, ніби він сам знаходиться в кабіні апарата. Такий підхід відкриває нові можливості у сфері дронопілотування, але водночас накладає додаткові вимоги до конструкції, системи керування та електронного забезпечення FPV-дронів.

Ключовою особливістю FPV-дрона є наявність FPV-камери та відеопередавача (VTX), які транслюють зображення з дрона на окуляри або монітор пілота. Це зображення передається у реальному часі з мінімальною затримкою (латентністю), **7** що особливо важливо під час швидкісного польоту або проходження перешкод. Для цього використовуються аналогові або цифрові системи передачі відео. Аналогові мають меншу затримку, але нижчу якість, цифрові — навпаки, забезпечують високу роздільну здатність, проте можуть мати більшу затримку.

FPV-дрони зазвичай мають конструкцію з акцентом на маневреність та динамічні характеристики. Вони здатні до виконання складних аеробатичних трюків, польотів на високій швидкості, різких поворотів та нахилів. Завдяки цьому FPV-дрони активно використовуються у дрон-рейсингу (перегонах) та фристайлі — польотах із виконанням трюків.

Для досягнення максимальної швидкості та маневреності FPV-дрони мають легку, компактну і водночас міцну раму, зазвичай виготовлену з карбону. Конструкція передбачає мінімум декоративних або додаткових елементів — лише все необхідне для польоту. Вага дрона суттєво впливає на динаміку, час польоту та можливість виконання складних маневрів.

На відміну від більшості споживчих дронів, які мають стабілізацію по всіх осях, FPV-дрони часто керуються в режимі Аcro (акробатичний режим), де пілот сам повністю відповідає за стабілізацію й утримання дрона в повітрі. Це вимагає високої майстерності, але дає значно більшу свободу в керуванні, **7** що важливо для **спортивного** чи трюкового польоту.

Більшість FPV-дронів використовують відкриті програмні платформи, такі як Betaflight, iNav або ArduPilot. Це дає можливість гнучко налаштовувати параметри польотного контролера, ПІД-регулятори, режими польоту, функції безпеки, GPS-навігацію, автоматичне повернення та інші можливості. Такий підхід робить FPV-дрони особливо привабливими для ентузіастів та інженерів, які хочуть модифікувати систему під власні потреби.

Через високу потужність двигунів та компактність FPV-дрони зазвичай мають відносно короткий час польоту — від 3 до 7 хвилин у спортивних моделях і до 15 хвилин у кінозйомочних. **7** Тому під час тривалих сесій пілоти використовують кілька акумуляторів.

FPV-польоти потребують хорошої просторової орієнтації, швидкої реакції та глибокого розуміння динаміки польоту. Для безпечного управління FPV-дроном необхідні тренування, часто спочатку на симуляторах, які моделюють поведінку реального дрона.

Оскільки польоти FPV-дронів пов'язані з великим ризиком падінь і зіткнень, їх конструкція часто є модульною: більшість компонентів можна легко замінити — двигуни, контролер, регулятори, камеру, відеопередавач тощо. Це дозволяє швидко відновити дрон після аварії.

Окремий підтип FPV-дронів — кінематографічні дрони, які мають плавне управління та потужні відеокамери (наприклад, GoPro або навіть професійні системи). Вони дозволяють створювати динамічні кадри з ефектом присутності, що стало трендом у сучасній відеозйомці.

## 1.6 Области застосування FPV-дронів

Однією з найпопулярніших сфер використання FPV-дронів є дрон-рейсинг — змагання, в яких пілоти проходять спеціальні траси на швидкість, керуючи дронами в режимі від

першої особи. Цей вид спорту **17** набуває все більшої популярності у світі, організовуються міжнародні чемпіонати, а також з'являються професійні команди та спонсори. FPV-рейсинг вимагає від пілота не лише технічної підготовки, а й реакції, точності та навичок пілотування у складних умовах. У цій галузі активно застосовуються легкі, швидкі та надзвичайно маневрені дрони, які дозволяють досягати швидкості понад 150 км/год.

Фрістайл — ще одна популярна форма використання FPV-дронів, де пілоти демонструють складні трюки, повороти, перевороти, польоти крізь перешкоди або об'єкти. Головна мета — створення видовищного, плавного і водночас технічно складного польоту. Такі польоти часто записуються на відео за допомогою додаткової HD-камери (наприклад, GoPro), і використовуються для контенту в соцмережах або відеоблогах. У фрістайлі FPV-дрони проявляють усі свої технічні можливості — миттєву зміну напрямку, точність та відгук на керування.

Останні роки FPV-дрони стали справжнім проривом у сфері відеопродакшну. Завдяки здатності літати в обмежених просторах, проходити вузькі отвори, швидко змінювати ракурс і водночас знімати плавне відео з високою роздільною здатністю, FPV-дрони стали незамінними для динамічної кінозйомки. Їх використовують у музичних кліпах, рекламних роликах, фільмах, телепередачах, відео для брендів, спортивних заходах тощо. Наприклад, FPV-дрони можуть ефектно пролетіти між глядачами, автомобілями, в приміщеннях, на заводах або навіть усередині будівель. Завдяки цьому досягається ефект присутності й динаміки, які складно реалізувати іншими методами.

Хоча FPV-дрони не призначені безпосередньо для промислової інспекції, деякі їх варіації успішно застосовуються для огляду конструкцій у важкодоступних або закритих приміщеннях. FPV-система дозволяє пілоту маневрувати в складних умовах — наприклад, усередині труб, між конструкціями, у вузьких проходах або занедбаних будівлях. Це особливо корисно під час попереднього візуального огляду будівель, мостів, тунелів, складів, шахт тощо. Оператор може швидко та точно оглянути об'єкт, не ризикуючи життям або здоров'ям, і зафіксувати відеоматеріал для подальшого аналізу.

FPV-дрони стали частиною нової хвилі інтерактивних шоу та виступів. Вони використовуються на масових заходах для створення вражаючих аерошоу, світлових інсталяцій, синхронізованих польотів. **17** На відміну від автономних swarm-дронів, FPV-дрони можуть керуватися вручну, створюючи індивідуальні елементи виступу з великою гнучкістю. Також дрони використовують для прямих трансляцій, «живих» відеозйомок зсередини подій — концертів, фестивалів, спортивних змагань тощо. Такі відео дарують глядачам унікальний ракурс і ефект залученості.

FPV-дрони активно застосовуються у навчальних закладах та гуртках технічної творчості. Завдяки відкритості апаратної та програмної архітектури, учні та студенти

можуть вивчати основи електроніки, програмування, аеродинаміки, фізики, розробляючи власні дрони або модифікуючи наявні. FPV-пілотування також покращує просторову орієнтацію, реакцію та розвиває аналітичне мислення. Тренування на FPV-симуляторах стали важливою частиною підготовки як новачків, так і професійних пілотів.

Завдяки своїм характеристикам, FPV-дрони часто використовуються для зйомки екстремальних видів спорту: сноубордингу, мотокросу, парапланеризму, скелелазіння, серфінгу тощо. Вони дозволяють супроводжувати спортсмена на великій швидкості, змінювати ракурс у русі й фіксувати моменти з максимально динамічної точки зору. Крім того, FPV-дрони використовуються в експедиціях, для дослідження печер, каньйонів, занедбаних об'єктів, де інші типи дронів можуть бути менш ефективними.

FPV-дрони стали інструментом для сучасних контент-мейкерів, які прагнуть виділити свої відео динамікою та унікальністю. Завдяки доступності обладнання та популярності відеоплатформ (YouTube, Instagram, TikTok), багато пілотів створюють авторські відео, проводять прямі трансляції польотів або діляться своїм досвідом, формуючи спільноту FPV-ентузіастів.

Хоча основна частина FPV-дронів розвивалася як інструмент для спорту та творчості, останні роки вони все активніше використовуються у військовій сфері. FPV-дрони стали важливим елементом сучасної тактики на полі бою завдяки своїй маневреності, точності та можливості віддаленого управління в режимі реального часу.

Їх застосовують для:

Повітряної розвідки — пілоти можуть оглядати позиції противника, проводити спостереження за місцевістю, не ризикуючи життям розвідників;

Коригування вогню — у поєднанні з артилерією чи мінометами FPV-дрони дозволяють точно наводити удари та оцінювати їх ефективність;

Атак на техніку або живу силу — з'явився окремий клас FPV-дронів-камікадзе, оснащених вибухівкою, які з високою точністю можуть вражати цілі, включаючи танки, бронетехніку, бліндажі або групи ворога;

Доставки легких вантажів у зону бойових дій — боеприпаси, медикаменти чи інші необхідні речі можуть оперативно доставлятися FPV-дронами.

Завдяки своїй дешевизні, простоті зборки та високій ефективності, FPV-дрони стали незамінним інструментом у сучасних конфліктах.

## 2 ВИБІР КОНСТРУКЦІЇ І КОМПОНЕНТІВ ДРОНА

## 2.1 Вибір конструкції дрона

Основні компоненти FPV-дрона охоплюють велику кількість деталей.

4 Розмір рами визначається в дюймах відповідно до розміру пропелерів, для яких вона спроектована: 5", 7", 10" тощо. Основні типи рам за формою: Hybrid X, TrueX, Deadcat, H, Square (Box) Найбільш популярний матеріал — міцний і легкий карбон. Варто пам'ятати, що карбон є електропровідним матеріалом. Товщина променів 7" дрона має бути не менше 5 мм.

Пропелери 4 маркуються за двома форматами: ДДКК x Л або Д x К x Л, де: Д — 4 довжина у дюймах К — крок — це відстань у дюймах, яку проходить пропелер за один обертЛ 4 — кількість лопастей: 4 наприклад, 8040x3, або 8x4x3 4 —це 4 8-дюймовий пропелер з кроком 4 дюйми і 3 лопатями. Напрямок обертання маркується так: CW – за годинниковою стрілкою, CCW – проти годинникової стрілки.

4 Для 4 FPV 4 дронів використовуються безколекторні двигуни. Діаметр та висота статора відображені в маркуванні (наприклад, мотор 2807 має діаметр статора 28 мм і висоту 7 мм). KV — кількість обертів двигуна на 1 вольт напруги. Для дронів з навантаженням зазвичай використовуються мотори 900-1500 KV. 4s-6s — цей параметр означає кількість послідовно з'єднаних елементів батареї, яка може жити даний мотор.

4 Польотний 4 контролер 4 — це плата керування дроном, яка обробляє сигнали власних сенсорів (гіроскоп, акселерометр та інші), підключених до нього пристроїв, команд пілота та обчислює швидкість, яку треба задати моторам. Польотний контролер має інтерфейси (UART, I2C, PWM тощо) для підключення ESC, VTX, RX, камери, GPS, сервомоторів та інших пристроїв. Сучасні польотні контролери працюють на процесорах F4, F7, H7. Польотний контролер може підтримувати програми BetaFlight, INAV, Ardupilot.

Регулятор обертів контролює швидкість моторів дрона згідно з командами польотного контролера. Регулятори обертів бувають формату 4in1 — для 4 моторів та окремі: один регулятор обертів — на один мотор. Постійний і піковий струм регулятора обертів мають враховуватися при підборі моторів. Регулятор обертів з новішою прошивкою BLHeli\_32 підтримують протокол Bidirectional DShot, який дозволяє регулятору обертів зчитувати швидкість обертання моторів й повідомляти RPM-телеметрію польотному контролеру, що покращує керованість дрона. Щоб увімкнути телеметрію моторів для регулятора обертів на BLHeli\_S, треба перепрошити його софтом Bluejay.

Відеопередавач 4 транслює відеосигнал з камери на окуляри пілота. Існують відеопередавачі для передачі аналогового та цифрового сигналу. Аналоговий сигнал є

більш стійким, забезпечує більшу дальність, але трансляцію може бачити будь-хто. Наразі найпоширеніші частоти аналогового відео 4 — 1,2 ГГц та 5,8 ГГц, цифрового — 5,8 ГГц. На частоті 5,8 ГГц (аналог) можуть одночасно літати 8 дронів. Рекомендовано використовувати потужні відеопередавачі від 1.6 Ватт (краще 2.5+) 4 польотний контролер може управляти відеопередавачем, 4 якщо той підтримує протоколи IRC Tramp або SmartAudio.

4 Радіоприймач отримує сигнали з пульта керування дроном і передає їх польотному контролеру. Найбільш поширені приймачі — TBS Crossfire або ExpressLRS, які працюють на протоколі CRSF. Основні робочі частоти — 868/915 МГц та 2,4 ГГц (для тренувань на невеликій відстані). Diversity приймачі з 2 антенами забезпечують більш стійкий зв'язок.

4 Камери для цифрових та аналогових FPV- 4 систем несумісні. Камери випускають 4 в розмірах Mini (21x21 мм), Micro (19x19 мм), Nano (17x17 мм). 4 Розподільна здатність аналогової камери вимірюється в TVL (телевізійні лінії). Цей показник має бути в діапазоні 1000-1500 TVL, чим більше — тим краще.

4 В FPV дроні є як мінімум 2 антени: антена радіоприймача для приймання сигналів з пульта керування (зазвичай 868/915 МГц або 2,4 ГГц), антена відеопередавача для передачі відео з дрона на окуляри пілота (зазвичай, 5,8 або 1,2 ГГц). Антени бувають всеспрямовані та спрямовані, лінійної або кругової поляризації. Для передачі аналогового відео зазвичай використовуються антени кругової правої поляризації (RHCP), для передачі цифрового — лівої (LHCP).

4 В FPV використовуються літій-полімерні та літій-іонні батареї. Літій-полімерні батареї мають кращу струмовіддачу, літій-іонні батареї — більшу ємність при тій же вазі і дешевші за літій-полімерні батареї. Кількість послідовно з'єднаних елементів в батареї визначає напругу збірки і зазначається маркуванням: 3s, 4s, 6s. Батарея 6s2p — це 2 паралельно з'єднані 6s збірки. Батареї кріплять до дрона за допомогою пари стрепів.

В вигляді додаткового обладнання часто використовують модулі скидів, модулі GPS та модулі магнетометрів, пищалки які допомагають знаходити FPV-дрон в випадку аварії, також використовують деталі друковані на 3-D принтері такі як фіксатори для камер, ніжки для безпечної посадки FPV-дрона тощо. На рис. 2.1 представлені основні компоненти FPV-дрона.

Рисунок 2.1 – Основні компоненти FPV-дрона

Основне обладнання для роботи з FPV-дроном це – пульт та FPV-окуляри. Пульт 4 – це портативний пристрій, яким пілот керує дроном. Пульт передає радіосигнал на радіоприймач дрона, під'єданого до польотного контролера, а польотний контролер

конвертує сигнали у рухи дрона. Частота роботи пульта і радіоприймача дрона мають співпадати, а протоколи бути сумісними, щоб прилади могли з'єднатися. **13** Зазвичай до пульта потрібно додатково придбати акумулятори і чохол. Якщо в комплекті немає захисту для стіків, його можна надрукувати на 3D-принтері. На рисунку 2.2 наведено пульт FPV-дрона.

Рисунок 2.2 – Пульт (радіопередавач) FPV-дрона

FPV-окуляри приймають відеосигнал з відеопередавача дрона і дозволяють пілоту бачити картинку з FPV камери дрона. Окуляри бувають аналогові та цифрові. Для цифрових окулярів існують аналогові адаптери, які дозволяють приймати сигнал з аналогових відеопередавачів. Зазвичай окуляри продаються із вбудованим відеоприймачем на 5.8 ГГц. Приймачі Diversity мають виходи на 2 антени, що дозволяє пристрою обрати і використати більш потужний сигнал. **13** Аналоговий сигнал є не зашифрованим і відео з аналогового відеопередавача може прийняти будь-який відеоприймач в зоні випромінювання антени. Цифровий сигнал зашифрований і якість цифрового відео набагато краще за аналогове. Проте, **17** на відміну від цифрового, аналоговий сигнал може забезпечити дальність польоту в десятки кілометрів. Наразі на фронті переважно використовують аналогові FPV-системи [2]. На рисунку 2.3 наведено аналогові окуляри FPV-дрона.

Рисунок 2.3 – Аналогові окуляри (відеоприймач) FPV-дрона

## 2.2 Вибір основних компонентів дрона

Польотний контролер керує внутрішніми модулями гіроскопа, барометра, та модулями периферії такими як VTX, ESC, ELRS.

**8** Завданням датчика IMU (гіроскопа) є вимірювання руху та орієнтації квадрокоптера. Датчик IMU містить акселерометр (ACC) і гіроскоп (Gyro).

**8** Контролер польоту (FC) на дроні використовує ряд датчиків для визначення руху та орієнтації. Основний датчик, який використовується для цієї мети, називається інерційний блок вимірювання (IMU). IMU містить як акселерометр, так і гіроскоп.

**8** Гіроскоп використовується для вимірювання кутової швидкості, тоді як акселерометр вимірює лінійне прискорення. Найпопулярніший режим польоту в Betaflight, Acro Mode, використовує лише гіроскоп, тоді як багато інших режимів польоту, таких як Angle Mode, Horizon Mode і Rescue Mode, вимагають для роботи як гіроскоп, так і акселерометр.

**8** Наявність **10** барометра, вбудованого у польотний контролер, може зробити політ за допомогою GPS точнішим (наприклад, у режимі GPS Rescue Mode), але він не є

обов'язковим. І також показати висоту на яку FPV 10 піднявся 10 під час польоту.

**10 VTX** - це відеопередавач, який є ключовим елементом FPV-дрона. Його основне завдання — передавати відеосигнал з камери дрона до FPV-окулярів або наземної станції пілота в режимі реального часу. Завдяки цьому пілот бачить «очима» дрона та може точно керувати ним, особливо в складних або швидкісних умовах.

Передавання відео відбувається зазвичай на частоті 5.8 ГГц, яка широко використовується для FPV-польотів через доступність та меншу схильність до перешкод. VTX приймає відеосигнал від FPV-камери та транслює його в ефір, де його приймає відеоприймач (VRX), вбудований у окуляри або монітор.

Більшість VTX мають можливість налаштування каналу та потужності передавання. Це дозволяє обирати частоту, яка не заважає іншим пілотам, особливо під час групових польотів. Потужність передавача (вимірюється у міліватах, наприклад, 25 мВт, 200 мВт, 800 мВт) впливає на дальність та якість зв'язку. Вища потужність забезпечує більший радіус дії, але водночас може спричинити завади для інших дронів та швидше нагрівати пристрій.

Також сучасні VTX можуть підтримувати функції SmartAudio або IRC Tramp — це дозволяє змінювати параметри передавання (канал, потужність тощо) безпосередньо з апаратури керування або через бортовий контролер, що спрощує налаштування та економить час пілота.

ELRS (радіоприймач) в FPV-дроні відповідає за прийом керуючих сигналів від пульта управління (радіопередавача). Він передає ці сигнали на політний контролер, який виконує відповідні команди: змінює оберти моторів, стабілізує політ, активує режими тощо.

Радіоприймач працює на окремій частоті (зазвичай 2.4 ГГц або 915 МГц) і повинен бути сумісним з передавачем. Сучасні приймачі часто підтримують протоколи з низькою затримкою та високою надійністю (наприклад, ELRS, Crossfire), що особливо важливо для точного керування під час швидкісних польотів або на далекій відстані.

ESC (регулятор обертів) в FPV-дроні керує швидкістю обертання моторів. Він отримує сигнали від політного контролера та відповідно регулює подачу електроенергії на кожен мотор, забезпечуючи зміну тяги та стабільність польоту.

ESC перетворює постійний струм з акумулятора на імпульси потрібної частоти для безколекторного мотора. Крім того, деякі ESC можуть передавати телеметрію (наприклад, струм, температуру, оберти) назад на політний контролер для покращення керування та захисту дрона.

В моїй конструкції FPV-дрона я буду використовувати: раму KHARAK 7.2 7", мотори ECOII 2807 1300KV, стак з польотного контролера та регулятора обертів Speedybee F405 v4 Stack, відеопередавач RushFPV Max Solo 5.8Ghz, антену відео Foxeer Lollipop 4plus mini RHCP, камеру Foxeer Cat3 micro, радіоприймач ExpressLRS Receiver RF Freq: 915Mhz, пропелери HQProp 7040 4шт, 2 стрепи 25-30 см, батарею LiIon 6s2p на елементах Samsung 21700 8000mah 80A.

Тактико-технічні характеристики FPV-дрона:

Дальність польоту до 12 км;

Корисне навантаження до 1 кг;

Крейсерська швидкість 60-80 км/год.

## 3 РОЗРОБЛЕННЯ ПОЛЬОТНОГО КОНТРОЛЕРА FPV-ДРОНА

### 3.1 Основні функції польотного контролера FPV-дрона

**1** Польотний контролер - один з найважливіших компонентів FPV-дрона. Він відповідає за стабілізацію дрона, забезпечення точних маневрів і надання даних пілоту. У цій статті ми детально пояснимо, що таке польотний контролер, як він працює і чому це така важлива частина будь-якого дрона. Незалежно від того, новачок ви чи досвідчений пілот, розуміння основ роботи контролерів польоту має вирішальне значення для отримання максимального задоволення від польотів. Контролер **1** польоту, **1** - це як мозок FPV-дрона. Це плата, оснащена датчиками, які визначають рухи дрона та команди користувача. Маючи цю інформацію, він регулює швидкість двигунів, щоб перемістити дрон у потрібному напрямку. Всі польотні контролери мають основні датчики, такі як гіроскопи (gyro) і акселерометри (acc), в той час як інші можуть включати інші датчики, такі як датчики барометричного тиску (барометр) і компаси (магнітометр).

**1** Польотний **1** контролер **1** також може слугувати хабом для інших периферійних пристроїв дрона, таких як регулятор **1** обертів, GPS модуль, **1** світлодіоди, сервоприводи, радіоприймач, FPV-камера **1** та відеопередавач. **1** З розвитком технологій контролери польоту стають меншими, більш функціональними і використовують кращі процесори та апаратне забезпечення.

**1** Коли справа доходить до контролерів польоту, є вибір не тільки апаратного забезпечення, але й прошивки. Різні варіанти прошивок пропонують різні функції та спеціалізації для різних застосувань. Наприклад, iNav розроблений з урахуванням використання GPS, в той час як Betaflight більше орієнтований на польотні характеристики. Список популярних варіантів прошивок польотного **1** контролера

1 для FPV дронів:

1 Betaflight – 1 це 1 прошивка з відкритим вихідним кодом має найбільшу базу користувачів, що дозволяє легко отримати допомогу в разі виникнення проблем. Він також має найширший спектр доступних польотних контролерів;

1 KISS – це прошивка з закритим вихідним кодом, апаратне забезпечення та прошивка контролюються приватною компанією. Це означає, що є 1 обмеження 1 у використанні їхніх власних контролерів польоту;

1 Прошивка iNav забезпечує автоматизований політ та GPS-навігацію.

1 Прошивку польотного контролера можна налаштувати за допомогою комп'ютера, смартфона або апаратури. Кожна прошивка має власний інтерфейс користувача (UI) і параметри, які можна змінювати. Однак навіть схожі на вигляд інтерфейси можуть давати різні льотні характеристики залежно від прошивки, тому потрібен час, щоб вивчити і пристосуватися до нової прошивки.

1 Tuning - це термін, який використовується, щоб описати процес налаштування параметрів, таких як PID, швидкості RC та інших, для досягнення бажаних льотних характеристик. Це важливий крок в оптимізації продуктивності FPV-дрона і отриманні максимальної віддачі від польотного 1 контролера.

1 Польотний контролер використовує мікроконтролери (MCU) для зберігання кодів прошивки та виконання складних обчислень. Існує кілька типів мікроконтролерів, які використовуються в польотному 1 контролері, 1 зокрема F1, F3, F4, F7 і H7. Основні відмінності між ними полягають у швидкості обчислень та обсязі пам'яті. В табл. 3.1 представлені типи мікроконтролерів польотного контролера.

Таблиця 3.1 – Типи мікроконтролерів польотного контролера.

Параметри

F1

F3

F4

F7

F7

Тактова частота

72мГц

72мГц

168мГц

216мГц

480мГц

Оперативна пам'ять

128кБ

256кБ

512кБ-1мБ

512кБ-1мБ

2мБ

**1** F4, F7 і H7 - чудові процесори, в той час як F1 і F3 більше не підтримуються в останніх версіях Betaflight через недостатню кількість пам'яті для розширення прошивки. Всі **1** вище перераховані мікроконтролери підтримують **1** універсальний асинхронний приймач/передавач (UART) – це апаратний послідовний інтерфейс, який дозволяє підключати зовнішні пристрої до польотного контролера. Приклади включають радіоприймачі, телеметрію, GPS та управління відеопередавача.

**1** Кожен UART має два виводи: один для передачі даних (TX) і один для прийому даних (RX). Важливо пам'ятати, що TX на периферійному пристрої з'єднується з RX на польотний **1** контролер, і навпаки. **1** Розуміння UART і його контактів має вирішальне значення для налаштування FPV-дрона для різних сценаріїв . Контролери польоту можуть мати різну кількість UART, тому перед покупкою потрібно **1** переконатись, **1** що їх достатньо для збірки.

**1** Якщо **1** потрібно більше портів UART, Betaflight має функцію під назвою SoftSerial, яка дозволяє створити до двох додаткових портів UART за допомогою програмного забезпечення. SoftSerial збільшує навантаження на процесор, він не підходить для повільних процесорів, можливо, доведеться знизити частоту PID-Loop. Крім того, SoftSerial має набагато нижчу частоту оновлення, що означає, що він не підходить для критично важливих модулів, таких як приймач сигналу і GPS.

**1** Мікроконтролери F3, F7 і H7 можуть обробляти інвертовані сигнали без додаткового

обладнання, проте F1 і F4 потребують зовнішнього інвертора для правильного зчитування сигналу. Щоб обійти цю проблему, деякі польотні контролери F4 мають спеціальний порт для підключення до системної шини (позначені SBUS). В табл. 3.2 представлені типи гіроскопів для FPV-дронів.

Таблиця 3.2 – Типи гіроскопів для FPV-дронів

Тип IMU

SPI, I2C

Максимальна частота роботи гіроскопа

MPU6000

I2C

4кГц

MPU6050

SPI, I2C

32кГц

MPU6500

I2C

32кГц

MPU9150

SPI, I2C

32кГц

MPU9250

SPI, I2C

32кГц

ICM20602

SPI, I2C

32кГц

ICM20608

SPI, I2C

32кГц

ICM20689

SPI, I2C

32кГц

ICM42688P

SPI, I2C

32кГц

BMI270

SPI, I2C

6.4кГц

1 Гіроскоп використовується для вимірювання кутової швидкості, тоді як акселерометр вимірює лінійне прискорення. Найпопулярніші типи гіроскопів для FPV виготовляються двома виробниками: InvenSense і Bosch Sensortec.

1 Зазвичай 1 в дронах передбачено так званий 1 чорний ящик (blackbox) який 1 є 1 корисний для налаштування та усунення несправностей. Можна записувати дані польоту двома способами - за допомогою вбудованої флеш-пам'яті або зберігати їх на SD-карті, якщо є бортовий логгер SD-карти

1 Флеш-пам'ять дешевша, але має обмежену ємність, зазвичай від 5 до 10 хвилин польотних даних. Завантаження даних з неї також може бути повільним. Використовуючи зчитувач SD-карт на польотному 1 контролері, можна 1 вести записи протягом усього року, не спустошуючи пам'ять, і це дає доступ до журналів миттєво, просто вставивши SD-карту в адаптер.

1 Бортовий журнал - обов'язкова річ для досвідчених пілотів. Вона дає можливість взяти максимальну продуктивність і детально діагностувати проблеми. Якщо у польотному контролері немає слота для SD-карти або флеш-пам'яті, також 1 можна 1 підключити зовнішній адаптер SD-карт до польотного 1 контролера через 1 UART.

1 В польотному контролері використовують два основні типи роз'ємів це пластикові роз'єми JST та точки для пайки. Пластикові роз'єми менш міцні, але зручні у використанні, в той час як точки пайки більш надійні, але вимагають пайки.

1 BEC (battery eliminator circuit) - це те, що називається регулятором напруги на польотному контролері. Майже всі польотні контролери мають 5В BEC для живлення радіоприймача, GPS і т.д., в той час як деякі також пропонують 9В 1 або 12В 1 BEC, призначені для живлення відеопередавача. Хоча можна живити обладнання безпосередньо від акумулятора, живлення від стабілізованого джерела живлення буде кращим.

1 Важливо вибрати правильне джерело живлення залежно від пристрою, який живиться. Деякі пристрої можна живити безпосередньо від LiPo батареї, наприклад, відеопередавач. Однак зазвичай живлення напряму від акумулятора веде до шуму, стрибки напруги можуть навіть пошкодити деякі модулі, якщо немає достатньої фільтрації. BEC діє як фільтр живлення і зазвичай є кращим джерелом живлення, але потрібно перевірити, чи відповідає він вимогам напруги та струму використаного 1 пристрою.

1 М'яке кріплення контролера польоту має важливе значення для оптимальної роботи, воно зменшує шум/вібрацію від рами до гіроскопа. Майже всі сучасні польотні 1 контролери 1 мають отвори М4, які дозволяють вставляти гумові демпфери, 1 щоб була можливість 1 використовувати кріплення М3 для закріплення плати в рамі [3].

### 3.2 Структурна схема вибраного польотного контролера FPV-дрона

Структурна схема проєктованого польотного контролера представлена на рис. 3.1. Мікроконтролер є центральною частиною системи, що координує роботу всіх підключених пристроїв. Він приймає, обробляє та передає дані між модулями. Для обміну інформацією з іншими компонентами використовуються стандартні цифрові інтерфейси — UART, SPI та I2C [4].

Рисунок 3.1 21 – Структурна схема польотного контролера

21 Гіроскоп, який підключається до мікроконтролера за допомогою SPI, використовується для вимірювання кутової швидкості. Він 21 є важливим елементом стабілізації, оскільки допомагає мікроконтролеру визначати положення дрона в просторі [5].

Барометр, з'єднаний через інтерфейс I2C, дозволяє вимірювати атмосферний тиск. На основі цих даних система обчислює висоту польоту. Це особливо важливо для підтримання стабільної висоти або реалізації автоматичних режимів, таких як

утримання висоти [6].

Уся система в межах блоку "Польотний контролер" поєднує мікроконтролер, гіроскоп і барометр, формуючи єдиний керуючий центр дрона. Взаємодія з іншими модулями забезпечує реалізацію функцій керування, навігації, стабілізації та передавання інформації, що дозволяє дрону працювати автономно або під керуванням оператора.

Мікроконтролер також керує роботою зовнішніх по відношенню до нього пристроїв.

Радіоприймач, з'єднаний з мікроконтролером через інтерфейс UART2, забезпечує прийом команд від оператора з наземного пульта керування. Ці команди можуть містити вказівки щодо напрямку руху, швидкості, висоти та інших параметрів польоту [7].

Відеопередавач, підключений через UART1, призначений для передавання відеосигналу в реальному часі з дрона до наземної станції. Це дозволяє оператору бачити, що відбувається навколо апарата **1** під час польоту, і приймати оперативні рішення [8].

Регулятор обертів, підключений через UART5, відповідає за керування швидкістю обертання моторів (M1–M4), а також може отримувати зворотні сигнали (S1–S4). Цей блок виконує команди від мікроконтролера для стабілізації та навігації **1** під час польоту [9].

### 3.3 Вибір польотного контролера FPV-дрона

Через ряд факторів, для своєї конструкції дрона я вибрав польотний контролер SpeedyBee f405 v4.

Цей контролер оснащений потужним процесором STM32F405 з тактовою частотою 168 МГц (ARM Cortex-M4). Така продуктивність забезпечує швидку обробку даних з гіроскопів та акселерометрів, мінімальну затримку та точний контроль дрона. Процесор STM32F405 дозволяє працювати з популярними прошивками, такими як Betaflight та INAV.

Процесор у польотному контролері виконує ключову роль у керуванні всіма аспектами польоту дрона. Це мікроконтролер серії STM32F405 від STMicroelectronics на базі ядра ARM Cortex-M4.

Процесор F405 обробляє сенсорні дані отримуючи дані з гіроскопа, акселерометра, барометра, GPS модуля.

Здійснює фільтрацію, об'єднання даних для визначення орієнтації, швидкості, висоти. Обчислює керування польотом, виконує PID-регулювання для стабілізації та

маневрування, реалізує режими польоту: Angle, Horizon, Acro тощо. Працює з прошивками типу Betaflight, INAV чи EmuFlight. Генерує PWM, DShot, OneShot сигнали для управління моторами. Приймає сигнали з радіо-приймача (SBUS, CRSF, DSMX). Відправляє дані на OSD, телеметрію (SmartPort, MSP, CRSF). Керує LED, базером, GPS, SD-картою. Отримує та обробляє налаштування з Betaflight Configurator або через USB/телеметрію [10].

На рис. 3.2 та на рис. 3.3 представлені верхня та нижня частини плати польотного контролера SpeedyBee F405 V4.

Рисунок 3.2 **20** – Зовнішній вигляд верхньої частини плати польотного контролера SpeedyBee F405 V4

Рисунок 3.3 **20** – Зовнішній вигляд нижньої частини плати польотного контролера SpeedyBee F405 V4

Процесор (MCU) має наступні характеристики:

Висока тактова частота (не менше 168 МГц, оптимально 216–480 МГц);

Архітектура ARM Cortex-M (зазвичай M4 або M7);

Підтримка багато ядерності (високопродуктивні моделі).

Гіростабілізація та датчики:

Швидкісні гіроскопи та акселерометри (наприклад, MPU6000);

Частота оновлення даних датчиків — не менше 8 кГц;

Підтримка динамічного фільтрування шуму.

Підтримка протоколів:

DSHOT (DSHOT300, DSHOT600, DSHOT1200);

PWM, Oneshot125, Multishot;

Протоколи радіокерування (CRSF, S.BUS, iBUS, DSMX);

Телеметрія SmartPort, MSP.

Підключення та інтерфейси:

UART-порти (не менше 4-х, оптимально 6+);

Підтримка USB Type-C для налаштування та оновлення;

I2C для підключення зовнішніх модулів (наприклад, барометра);

SPI для гіроскопів з низькою затримкою.

Пам'ять:

Оперативна пам'ять (RAM) не менше 512 КБ;

Флеш-пам'ять для збереження налаштувань (2–8 МБ);

Карта microSD для чорного ящика (blackbox).

Операційна система та прошивка:

Підтримка сучасних прошивок (Betaflight, iNav, Ardupilot);

Можливість оновлення прошивки через USB або Bluetooth.

Живлення:

Підтримка живлення від 24 2S до 6S (7.4–25.2 В);

Вбудований BEC (5 В, 9 В) для живлення зовнішніх модулів;

Захист від зворотного підключення живлення та перенапруги.

Особливості апаратної платформи:

Вбудований барометр (наприклад, BMP280);

Підтримка GPS для функцій утримання позиції та повернення додому;

Вбудований OSD (On-Screen Display) для FPV;

Легке оновлення та налаштування через конфігураційні програми.

Продуктивність та затримка:

Низька затримка обробки команд (не більше 2 мс);

Стабільність при високих навантаженнях і швидкісному польоті;

Підтримка динамічної зміни PID-налаштувань у польоті.

Функціональні можливості:

PID-регулювання з адаптацією до змін вібрацій та навантажень;

Підтримка функцій автопілота (залежно від прошивки);

Легке налаштування через мобільний додаток або ПК.

Форм-фактор і конструкція:

Компактний розмір (20x20 мм або 30.5x30.5 мм монтажні отвори);

Волого захищеність та віброізоляція.

Мала маса (не більше 20–30 г) [11].

Гіроскоп та акселерометр на базі ICM42688P забезпечують високу чутливість і швидку реакцію на зміни положення. Підтримка високої частоти оновлення (8 кГц) дозволяє ефективно гасити вібрації і покращує стабільність польоту.

Барометр Goertek SPA06-003 використовується для вимірювання атмосферного тиску та обчислення висоти польоту дрона. Завдяки високій точності вимірювань тиску (до 1 Па), цей датчик дозволяє мікроконтролеру з великою точністю визначати вертикальне положення літального апарата в просторі.

Контролер має 6 UART-портів, що забезпечує підключення радіо модуля, GPS, телеметрії та інших зовнішніх пристроїв. Наявність інтерфейсів I2C та SPI дозволяє інтегрувати додаткові датчики та модулі (наприклад, барометр чи магнітометр) [12].

Підтримка сучасних протоколів двигунів: DSHOT300, DSHOT600, DSHOT1200. Це дозволяє точно керувати швидкістю обертання моторів без аналогового сигналу. Підтримка популярних радіо протоколів: CRSF, S.BUS, iBUS, DSMX, що забезпечує універсальність використання різних систем керування.

Широкий діапазон вхідної напруги (до 6S – 25.2 В), що дозволяє використовувати потужні літій-полімерні акумулятори. Вбудований BEC на 5 В та 9 В для живлення зовнішніх модулів (камери, передавачі). Захист від зворотного підключення живлення та короткого замикання гарантує безпеку електроніки [13].

Підтримка підключення через Bluetooth/Wi-Fi з мобільного додатка SpeedyBee для швидкого налаштування без ПК. Інтерфейс USB Type-C забезпечує легке оновлення прошивки та доступ до чорного ящика (blackbox).

Вбудований OSD (On-Screen Display) для відображення даних телеметрії на FPV-екрані. Можливість запису даних на карту microSD для аналізу польоту. Інтеграція з камерою через DJI FPV Air Unit, що розширює можливості FPV-польотів [14].

Розмір монтажу 30.5x30.5 мм, що підходить для стандартних рам дронів. Легка вага (близько 7 г) зменшує навантаження на дрон. Якісна пайка та конденсатори для зменшення електричних шумів.

Низька затримка обробки команд та висока швидкість реакції. Гнучкість налаштування через додаток без підключення до ПК. Сумісність з різними компонентами FPV-системи, що дозволяє створити як гоночний, так і фрістайловий дрон.

SpeedyBee F405 V4 є сучасним, продуктивним і зручним польотним контролером, що підходить як для аматорських, так і для професійних FPV-дронів. Він забезпечує стабільний політ, точне керування та гнучкі можливості підключення різних компонентів, що робить його універсальним вибором для сучасних FPV-проектів [15]. На рис. 3.4 представлено з'єднання польотного контролера та периферії FPV-дрона.

Рисунок 3.4 – З'єднання польотного контролера та периферії FPV-дрона

На рисунку показано підключення відеопередавача через інтерфейс UART. Відеопередавач отримує сигнали керування від польотного контролера по лінії TX-IRC. На відеопередавач також поступає відеосигнал з відеокамери через плату польотного контролера на якій розташована мікросхема OSD, яка дозволяє накладати на відеозображення текстову інформацію.

До польотного контролера також підключена плата радіоканалу, яка забезпечує двонапрямлений зв'язок польотного контролера з пультом керування.

## 4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЛЬОТНОГО КОНТРОЛЕРА FPV-ДРОНА

### 4.1 Конфігуратор Betaflight

Для прошивки польотного контролера SpeedyBee f405 v4 я буду використовувати конфігуратор Betaflight версії 10.10.0. Посилання на конфігуратор та версію прошивки польотного контролера я залишу в переліку посилань [16], [17]. На рис. 4.1 представлена вітальна сторінка конфігуратора Betaflight.

Рисунок 4.1 – Вітальна сторінка конфігуратора Betaflight

Betaflight Configurator — це спеціалізований програмний інструмент для налаштування, конфігурації та моніторингу політних контролерів, які працюють під прошивкою Betaflight. Нижче представлено основні функції Betaflight configurator. Betaflight працює через USB-з'єднання з політним контролером. Визначає прошивку, серійний порт, інформацію про плати, наприклад тип процесора, кількість UART, версію Betaflight.

В самому конфігураторі можна налаштувати тип коптера (Multicopter, Fixed Wing,

Helicopter тощо), орієнтацію плати (Roll, Pitch, Yaw adjustment), режим радіопередавача (PPM, SBUS, iBUS, DSMX, Crossfire тощо), порти UART — визначення, який порт для якого пристрою (GPS, телеметрія, приймач, SmartAudio тощо).

Betaflight за допомогою власних пресетів(код яким можна керувати налаштуваннями функцій) можна налаштовувати гіроскоп (виявляє нахили та оберти), акселерометр (дозволяє стабілізацію, angle, horizon режим), компас (для GPS-навігації), барометр (вимірює висоту для AltHold режиму).

PID-контролери впливають на те, як апарат реагує на зміну орієнтації. Можна вручну змінювати P, I, D значення, або використовувати фільтри, як D-term Lowpass, Gyro Lowpass тощо.

Конфігурація ESC (регуляторів обертів): В конфігураторі налаштовується протокол сумісний з регулятором обертів( DShot, OneShot, MultiShot тощо), перевіряється та налаштовується робота двигунів (можна змінювати напрямок обертання), змінюється схема дрона (квадрокоптер X, +, гекса, окта, tricopter, тощо).

Призначення AUX-каналів на функції: Arm/Disarm, Angle / Horizon / Acro (Rate), Beeper, Flip Over After Crash (Turtle mode), GPS Rescue, Blackbox start/stop, Air Mode.

Налаштування відображення інформації на FPV-екрані: напруга акумулятора, таймер, статус GPS, режим польоту, поточна швидкість, висота, координати.

CLI (Command Line Interface): Дає змогу вводити команди вручну для детального налаштування більшості функцій. Часто використовують для функцій, яких немає в графічному інтерфейсі. Також є можливість імпорту/експорту конфігурації (diff, dump).

Реєстрація телеметричних даних у польоті для подальшого аналізу (через Betaflight Blackbox Explorer). Дуже корисно для PID-тюнінгу та діагностики проблем.

Прошивка або оновлення Betaflight на політному контролері. Є можливість завантаження прошивки з офіційного репозиторію Betaflight або з локального файлу. Вибір плати, версії, перевірка сумісності.

Відображення координат, кількості супутників, швидкості. Активування GPS Rescue mode (повернення додому у разі втрати сигналу).

#### 4.2 Основний код програмного забезпечення польотного контролера

Файл визначає інтерфейс для ініціалізації, конфігурації та керування портами введення-виведення (GPIO) мікроконтролера STM32F405. GPIO дозволяє налаштовувати піни мікроконтролера для виконання різних функцій, таких як:

Вхід або вихід для цифрових сигналів;

Альтернативні функції (наприклад, UART, SPI, I2C тощо);

Аналогові функції (наприклад, для АЦП);

Робота з різними швидкостями, типами виводів і підтяжками.

Захист від повторного включення виконують функції.

```
ifndef __STM32F4xx_GPIO_H, define __STM32F4xx_GPIO_H
```

Макрос `ifndef` запобігає повторному включенню файлу, що захищає від помилок компіляції.

Нижче наведено код для перевірки підтримуваних портів GPIO.

```
define IS_GPIO_ALL_PERIPH(PERIPH) (((PERIPH) == GPIOA) || \
```

```
((PERIPH) == GPIOB) || \
```

```
((PERIPH) == GPIOC) || \
```

```
((PERIPH) == GPIOD) || \
```

```
((PERIPH) == GPIOE) || \
```

```
((PERIPH) == GPIOF) || \
```

```
((PERIPH) == GPIOG) || \
```

```
((PERIPH) == GPIOH) || \
```

```
((PERIPH) == GPIOI) || \
```

```
((PERIPH) == GPIOJ) || \
```

```
((PERIPH) == GPIOK)
```

Макрос перевіряє, чи є переданий порт (PERIPH) одним із підтримуваних портів GPIO (від GPIOA до GPIOK). Це забезпечує коректність використання портів у функціях.

Файл визначає кілька перелічень для конфігурації GPIO. Режими GPIO (`GPIO_Mode_TypeDef`).

```
typedef enum
```

```

{
GPIO_Mode_IN = 0x00, /*!< GPIO Input Mode */
GPIO_Mode_OUT = 0x01, /*!< GPIO Output Mode */
GPIO_Mode_AF = 0x02, /*!< GPIO Alternate function Mode */
GPIO_Mode_AN = 0x03 /*!< GPIO Analog Mode */
} GPIOMode_TypeDef;

```

GPIO\_Mode\_IN пін налаштований як вхід. GPIO\_Mode\_OUT пін налаштований як вихід. GPIO\_Mode\_AF пін використовується для альтернативної функції (наприклад, UART, SPI). GPIO\_Mode\_AN пін налаштований для аналогових функцій (наприклад, для АЦП). Макрос IS\_GPIO\_MODE перевіряє коректність режиму.

Нижче наведено типи виводів (GPIOType\_TypeDef).

```

typedef enum
{
GPIO_OType_PP = 0x00, /*!< Push-Pull */
GPIO_OType_OD = 0x01 /*!< Open-Drain */
} GPIOType_TypeDef;

```

GPIO\_OType\_PP режим "Push-Pull" (вивід активно видає високий або низький рівень). GPIO\_OType\_OD режим "Open-Drain" (вивід може бути тільки низьким або у високому імпедансі). Макрос IS\_GPIO\_OTYPE перевіряє коректність типу.

Нижче наведено швидкість виводів (GPIOSpeed\_TypeDef).

```

typedef enum
{
GPIO_Low_Speed = 0x00,
GPIO_Medium_Speed = 0x01,
GPIO_Fast_Speed = 0x02,

```

```
GPIO_High_Speed = 0x03
```

```
} GPIO_Speed_TypeDef;
```

Визначає частоту перемикання пінів (від низької до високої швидкості). Легасі-визначення (наприклад, GPIO\_Speed\_2MHz) забезпечують сумісність зі старими версіями. Макрос IS\_GPIO\_SPEED перевіряє коректність швидкості.

Нижче наведено підтяжки (GPIO\_PuPd\_TypeDef).

```
typedef enum
```

```
{
```

```
GPIO_PuPd_NOPULL = 0x00,
```

```
GPIO_PuPd_UP = 0x01,
```

```
GPIO_PuPd_DOWN = 0x02
```

```
} GPIO_PuPd_TypeDef;
```

Налаштування внутрішніх резисторів підтяжки: без підтяжки, підтяжка вгору або вниз. Макрос IS\_GPIO\_PUPD перевіряє коректність.

Нижче наведено дії над бітами (BitAction).

```
typedef enum
```

```
{
```

```
Bit_RESET = 0,
```

```
Bit_SET
```

```
} BitAction;
```

Використовується для встановлення або скидання бітів (логічний 0 або 1). Макрос IS\_GPIO\_BIT\_ACTION перевіряє коректність дії.

Нижче наведено структура ініціалізації GPIO.

```
typedef struct
```

```
{
```

```
uint32_t GPIO_Pin;  
  
GPIO_Mode_TypeDef GPIO_Mode;  
  
GPIO_Speed_TypeDef GPIO_Speed;  
  
GPIO_OType_TypeDef GPIO_OType;  
  
GPIO_PuPd_TypeDef GPIO_PuPd;  
  
} GPIO_InitTypeDef;
```

Ця структура використовується для конфігурації пінів GPIO. Вона містить GPIO\_Pin. Маска пінів для конфігурації (наприклад, GPIO\_Pin\_0). GPIO\_Mode режим роботи (вхід, вихід, альтернативна функція, аналоговий). GPIO\_Speed швидкість піна. GPIO\_OType. Тип виведення (Push-Pull або Open-Drain). GPIO\_PuPd налаштування підтяжки.

```
define GPIO_Pin_0 ((uint16_t)0x0001)
```

```
define GPIO_Pin_1 ((uint16_t)0x0002)
```

```
define GPIO_Pin_All ((uint16_t)0xFFFF)
```

Визначають маски для вибору конкретних пінів (від 0 до 15) або всіх пінів. Макроси IS\_GPIO\_PIN і IS\_GET\_GPIO\_PIN перевіряють коректність вибору пінів.

Нижче наведено джерела пінів для альтернативних функцій.

```
define GPIO_PinSource0 ((uint8_t)0x00)
```

```
define GPIO_PinSource1 ((uint8_t)0x01)
```

```
define GPIO_PinSource15 ((uint8_t)0x0F)
```

Використовуються для налаштування альтернативних функцій пінів. Макрос IS\_GPIO\_PIN\_SOURCE перевіряє коректність.

Нижче наведено альтернативні функції GPIO.

```
define GPIO_AF_RTC_50Hz ((uint8_t)0x00)
```

```
define GPIO_AF_MCO ((uint8_t)0x00)
```

```
define GPIO_AF_EVENTOUT ((uint8_t)0x0F)
```

Визначають коди альтернативних функцій (AF0–AF15) для різних периферійних модулів

(UART, SPI, I2C, CAN тощо). Різні набори альтернативних функцій визначені для різних моделей STM32F4 (наприклад, STM32F405, STM32F446 тощо). Макроси IS\_GPIO\_AF перевіряють коректність для конкретної моделі мікроконтролера.

Файл оголошує прототипи функцій для роботи з GPIO. Скидання конфігурації GPIO.

```
void GPIO_DeInit(GPIO_TypeDef* GPIOx);
```

Скидає конфігурацію заданого порту GPIO до стану за замовчуванням.

Нижче наведено ініціалізацію типів GPIO.

```
void GPIO_Init(GPIO_TypeDef* GPIOx, GPIO_InitTypeDef* GPIO_InitStruct);
```

```
void GPIO_StructInit(GPIO_InitTypeDef* GPIO_InitStruct);
```

GPIO\_Init налаштовує пини порту GPIO відповідно до параметрів у структурі GPIO\_InitTypeDef. GPIO\_StructInit заповнює структуру GPIO\_InitTypeDef значеннями за замовчуванням.

Нижче наведено блокування пінів GPIO.

```
void GPIO_PinLockConfig(GPIO_TypeDef* GPIOx, uint16_t GPIO_Pin);
```

Блокує конфігурацію пінів, щоб запобігти їх зміні до скидання. Читання та запис GPIO.

```
uint8_t GPIO_ReadInputDataBit(GPIO_TypeDef* GPIOx, uint16_t GPIO_Pin);
```

```
uint16_t GPIO_ReadInputData(GPIO_TypeDef* GPIOx);
```

```
uint8_t GPIO_ReadOutputDataBit(GPIO_TypeDef* GPIOx, uint16_t GPIO_Pin);
```

```
uint16_t GPIO_ReadOutputData(GPIO_TypeDef* GPIOx);
```

```
void GPIO_SetBits(GPIO_TypeDef* GPIOx, uint16_t GPIO_Pin);
```

```
void GPIO_ResetBits(GPIO_TypeDef* GPIOx, uint16_t GPIO_Pin);
```

```
void GPIO_WriteBit(GPIO_TypeDef* GPIOx, uint16_t GPIO_Pin, BitAction BitVal);
```

```
void GPIO_Write(GPIO_TypeDef* GPIOx, uint16_t PortVal);
```

```
void GPIO_ToggleBits(GPIO_TypeDef* GPIOx, uint16_t GPIO_Pin);
```

Функції для читання стану входів/виходів, встановлення, скидання або перемикання бітів пінів. Налаштування альтернативних функцій GPIO.

```
void GPIO_PinAFConfig(GPIO_TypeDef* GPIOx, uint16_t GPIO_PinSource, uint8_t GPIO_AF);
```

Налаштовує альтернативну функцію для заданого піна. Файл підтримує різні моделі мікроконтролерів STM32F4 (наприклад, STM32F405, STM32F410, STM32F446 тощо). Для цього: використовуються умовні директиви компіляції (if defined()), визначені різні набори альтернативних функцій для різних моделей, макроси IS\_GPIO\_AF адаптовані для конкретних моделей.

```
define GPIO_Mode_AIN GPIO_Mode_AN
```

```
define GPIO_AF_OTG1_FS GPIO_AF_OTG_FS
```

```
define GPIO_AF_OTG2_HS GPIO_AF_OTG_HS
```

```
define GPIO_AF_OTG2_FS GPIO_AF_OTG_HS_FS
```

Ці визначення забезпечують сумісність зі старими версіями бібліотеки, де використовувалися інші назви.

Типовий приклад використання файлу для ініціалізації піна GPIO.

```
include "stm32f4xx_gpio.h"
```

```
void configure_gpio(void) {
```

```
GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
```

```
// Увімкнення тактування для порту GPIOA
```

```
RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOA, ENABLE);
```

```
// Налаштування структури ініціалізації
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_5; // Пін PA5
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_OUT; // Режим виходу
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Low_Speed; // Низька швидкість
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP; // Push-Pull
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL; // Без підтяжки
```

```
// Ініціалізація піна
```

```
GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);
```

```
// Встановлення піна в логічну 1
```

```
GPIO_SetBits(GPIOA, GPIO_Pin_5);}
```

Текст програми для роботи польотного контролера з використанням графічного середовища наведено в додатку А.

## 5 МОНТУВАННЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ ПОЛЬОТНОГО КОНТРОЛЕРА

### 5.1 Монтування FPV-дрона

Процес складання FPV-дрона починається зі збірки рами. Раму комплектують із карбонових частин: нижні та верхні пластини, плечі, кріплення для електроніки та камери. Їх з'єднують гвинтами, використовуючи амортизуючі стійки для політного контролера та VTX. На цьому етапі важливо дотримуватись інструкції виробника, щоб забезпечити міцність і правильну геометрію конструкції.

Далі визначається дизайн дрона — розміщення та орієнтація всіх компонентів: ESC, політного контролера, VTX, радіоприймача, а також прокладання дротів. Добре продуманий дизайн допомагає уникнути перешкод, забезпечує ефективне охолодження та полегшує обслуговування. Також на цьому етапі обирається, де буде проходити антена, де закріплювати акумулятор і як буде розміщена FPV-камера.

Після цього виконується розпайка регулятора обертів (ESC). Він монтується в центр рами, а до нього припаюють силові дроти моторів, а також "+" і "-" живлення від акумулятора (XT60 або XT90 роз'єм) і конденсатор. Важливо переконатися у правильному порядку підключення моторів, що відповідає розташуванню в прошивці політного контролера.

Наступним кроком є розпайка політного контролера (FC). До нього підключають ESC (керуючі сигнали), живлення, VTX, радіоприймач, FPV-камеру та. Пайка має бути акуратною та надійною, з короткими дротами, щоб уникнути шумів та вібрацій.

Перед фінальним збиранням проводиться перше підключення з використанням стоп-смокера — це захисний пристрій, який обмежує струм і дозволяє безпечно виявити коротке замикання або неправильне підключення перед тим, як подавати повну напругу. Якщо все працює нормально (немає диму, писків, надмірного нагріву), можна переходити далі.

Завершальним етапом є фінальна збірка. Встановлюються всі компоненти на місце, акуратно фіксуються дроти, монтуються пропелери (лише після повної перевірки системи), закріплюються антени та акумулятор. Дрон проходить фінальну перевірку у

Betaflight, калібруються датчики, задаються режими польоту — і після цього дрон готовий до випробувального польоту. На рис. 5.1 та на рис. 5.2 представлена конструкція проєктованого дрона.

Рисунок 5.1 – Конструкція проєктованого дрона

Рисунок 5.2 –Зовнішній вигляд проєктованого дрона в повній комплектації

## 5.2 Програмування польотного контролера Speedybee f405 v4

Оскільки у польотного контролера є своя заводська прошивка яка не підходить для мене через підготовлений пресет (кодові налаштування функцій) перед його програмуванням потрібно зберегти поточні налаштування, щоб була можливість їх відновити якщо станеться помилка прошивки. Для цього підключаємо політний контролер до ПК за допомогою USB-TypeC кабелю, заходимо в командну строку CLI та вводим команду `dump` або `diff all`. Після цього копіюємо всі параметри у текстовий файл. Також на польотний контролер потрібно встановити USB-драйвер для того, щоб конфігуратор бачив DFU режим польотного контролера (наприклад, Zadig). На рис. 5.3 представлений вид командної строки CLI.

Рисунок 5.3 – Вид командної строки CLI

Щоб розпочати програмування польотного контролера потрібно зайти в розділ `Update Firmware`, там у нас є можливість вибрати версію контролера та бажаної прошивки, також можна вибрати потрібний радіопротокол, протокол телеметрії, протокол моторів.

Є 2 опції прошивки ,прошивка онлайн з офіційного хмарного сховища та прошивка від локального файлу в hex форматі, локальну прошивку можна взяти в офіційному репозиторії Betaflight. Перед програмуванням потрібно вибрати опцію `Full chip erase`. За допомогою цієї опції повністю очиститься стара версія прошивки.

При програмуванні онлайн нам потрібно натиснути кнопку завантажити прошивку онлайн, після цього не потрібно нічого робити оскільки польотний контролер автоматично перейде в DFU режим та розпочне прошивку. При закінченні прошивки вилізе повідомлення "Programming Successful" у разі успіху.

Якщо треба завантажити прошивку локально нам обов'язково потрібно увійти у DFU режим, для цього потрібно витягнути USB кабель якщо він запханий, зажати кнопку `BOOT` на польотному контролері та запхати кабель назад. Після цього вгорі у Betaflight має з'явитись порт DFU. Тепер натискаємо кнопку завантажити прошивку локально та вибираємо файл на ПК. Натискаємо кнопку прошити прошивку. При закінченні прошивки

вилізе повідомлення "Programming Successful" у разі успіху.

Після прошивки політний контролер перезапуститься, тепер треба відкрити командну строку CLI, та вставити туди раніше збережений файл dump або diff, щоб відновити налаштування. Після відновлення налаштувань контролер знову перезапуститься. Тепер політний контролер готовий до роботи. На рис. 5.4 представлено вид розділу оновлення прошивки.

Рисунок 5.4 – Вид розділу оновлення прошивки

### 5.3 Робота з помилками, що виникли під час програмування

Під час програмування та після нього можуть виникнути багато помилок в роботі польотного контролера. Нижче представлені основні причини помилок та способи їх вирішення.

Контролер не входить у DFU-режим. Якщо контролер не входить у DFU-режим можливі такі причини – відсутній драйвер (WinUSB), плата не має кнопки BOOT, або вона неправильно затиснута, USB-кабель — тільки зарядний (без передачі даних). Можливі рішення проблеми – встановити Zadig, вибрати пристрій STM32 BOOTLOADER і змінити драйвер на WinUSB, перевірити кабель (замість зарядного використати якісний дата-кабель), затиснути BOOT перед підключенням до USB.

Помилка No response from the bootloader. Можливі причини даної проблеми – немає DFU-з'єднання, контролер завис або несправний, конфігуратор не бачить порт. Вирішення цієї помилки – переконатись, що вгорі обрано порт DFU, перезапустити контролер у режимі BOOT, перезапустити Betaflight Configurator, спробувати інший USB-порт.

Помилка FAILED TO OPEN SERIAL PORT. Причини даної помилки – порт зайнятий іншою програмою, проблеми з драйверами або кабелем. Рішення проблеми – закрити інші програми (наприклад, INAV, STM32 Flash Loader), перевірити драйвери у диспетчері пристроїв, використати Zadig для оновлення драйвера.

Помилка Programming FAILED. Які причини – вибрано неправильну плату в прошивці, файл прошивки пошкоджений, проблеми з живленням. Можливі рішення – перевірити, що обрана точна назва плати (наприклад, MATEKF405SE □ MATEKF405STD), спробувати Full chip erase, повторно завантажити прошивку або вибрати іншу версію прошивки.

"Brick" після прошивки. Ознаки даної проблеми – плата не запускається, не визначається через USB, світиться лише один світлодіод. Причини – завантажено непідтримувану прошивку, під час прошивки втрачено живлення. Рішення проблеми – увійти у BOOT-режим вручну (кнопка + підключення), прошити повторно з опцією Full

chip erase.

Контролер прошився, але всі функції заблоковано або вони не працюють. Причини – пошкоджений файл прошивки, прошивка несумісна з польотним контролером, некоректно встановлені драйвера прошивки. Рішення – перепрошити контролер з функцією Full chip erase.

Команди з diff all викликають помилки. Типові повідомлення – Unknown command, Invalid value, Feature not available. Причини – нова прошивка не підтримує старі параметри, змінилася структура налаштувань (наприклад, feature MOTOR\_STOP замінили або видалили), налаштування зберігалися з іншої плати чи версії. Рішення – вставляти diff all поступово по 5-10 рядків, якщо помилка не зникла знайти рядок, який її викликає, і видалити або адаптувати його, ознайомтеся зі списком підтримуваних команд (help у CLI).

Після вставлення diff – FC поводить себе некоректно. Симптоми – режими польоту не вмикаються, приймач не працює, ESC не реагують, гвинти обертаються без причини. Причини – неправильні або застарілі resource-прив'язки, активовані несумісні feature, UART-налаштування не відповідають новій прошивці. Рішення – скинути контролер (defaults) і налаштувати вручну, прописати тільки актуальні diff all налаштування, використовувати Betaflight Documentation для перевірки змін.

# Посилання

---

Це джерела виділених збігів у вашому документі. Кожен збіг позначено темно-зеленим числом, яке відповідає вказаному тут джерелу. Джерела впорядковані за схожістю — чим вищий бал, тим сильніше збіг.

#	Джерело	%
1	onefpv.com	8.9%
2	moodle.znu.edu.ua	5.4%
3	uk.wikipedia.org / Будова_літальних_апаратів	5.4%
4	vsau.org	3.5%
5	courses.prometheus.org.ua	2.5%
6	ndekc.lviv.ua	1.3%
7	hackyourmom.com	1.2%
8	onefpv.com	0.9%
9	ela.kpi.ua	0.5%
10	onefpv.com	0.3%
11	er.nau.edu.ua	0.3%
12	chota.plast.org.ua	0.3%
13	vsau.org	0.2%
14	duikt.edu.ua	0.2%
15	pdfkiwi.com	0.2%
16	openarchive.nure.ua	0.2%
17	repositsc.nuczu.edu.ua	0.1%
18	files.znu.edu.ua	0.1%
19	ela.kpi.ua	0.1%
20	dspace.nbu.gov.ua	0.1%
21	ela.kpi.ua	0.1%
22	openarchive.nure.ua	0.1%
23	dglib.nubip.edu.ua	0.1%

#	Джерело	%
24	polagraph.cz	0.0%



Дякуємо, що перевірили  
свій документ за допомогою  
Plag!