



Звіт про оригінальність

● Оцінка схожості

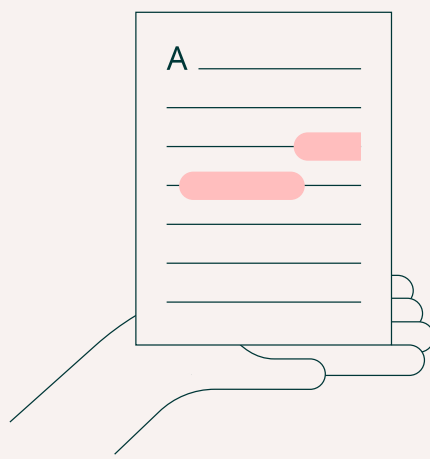
%10

● Ризик плагіату

ВИСОКИЙ

☺ Ігор Кагало ⌚ 2025-06-13 10:28

Посилання на звіт: 109h9 / 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

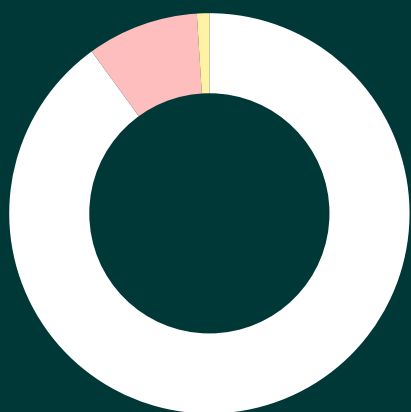
Збіги

Посилання

Ваш документ було перевірено за такими джерелами:

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

Бали



Збіги тексту	9%
Перефразування	1%
Цитований текст	0%
Неправильне цитування	0%
Збігів не знайдено	90%

Ризик плагіату

ВИСОКИЙ

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.

% 10

Збіги

ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) відомі ще з минулого століття. Перший БПЛА був створений у 1917 році Ніколасом Кіфером для військових цілей під час Першої світової війни [1]. В наш час для безпілотних апаратів, включаючи повітряні, наземні та підводні, широко використовується термін “дрон”. За визначенням Вікіпедії безпілотний літальний апарат (в англ. термінології UAV – unmanned aerial vehicle), широко відомий як дрон, — це літальний апарат, на борту якого немає людини-пілота, екіпажу чи пасажирів, а керується дистанційно або автономно [2, 3].

FPV-дрони (First person view) є різновидом безпілотних літальних апаратів або ж дрони з видом від першої особи, що дозволяють пілоту бачити «очима» дронів. Оснащені камерою високої чіткості, вони транслюють відео в реальному часі на окуляри або екран [4, 5].

FPV-дрони широко використовуються в різних галузях: сільському господарстві, аерозйомці, спортивних змаганнях, військовій справі тощо. Розвиток цього виду літальних апаратів є надзвичайно актуальним. Завдяки сучасним технологіям їх характеристики невпинно покращуються.

У дипломному проєкті розглянуто конструкції FPV-дронів, технічні засоби для їх реалізації, особливу увагу приділено аналізу електричних двигунів та електронних засобів для регулювання числа їх обертів, вибрано конкретні типи рами, двигунів, пропелерів та електронного контролера швидкості обертання двигунів для фізичної реалізації проєктованого FPV-дрона.

1 FPV-ДРОНИ

Основні типи конструкції FPV-дронів

Конструкції FPV-дронів, як і конструкції БПЛА, можна розділити на дві основні групи: літакового типу і коптерного типу. Проте, FPV-дрон повинен забезпечити пілоту, який керує його польотом, видимість навколишнього простору в зоні польоту, тобто пілот віртуально повинен знаходитись в зоні польоту FPV-дрона. Саме ця особливість

відрізняє FPV-дрон від інших типів БПЛА.

На рис.1.1 представлені найбільш поширені типи конструкції БПЛА [6].

Рисунок 1.1 – Поширені типи конструкції БПЛА

Розглянемо показані конструкції БПЛА з позиції реалізації на їх основі FPV-дронів, які повинні забезпечувати пілоту видимість зони польоту FPV-дрона та можливість керувати польотом. Це означає, що FPV-дрон повинен бути оснащений технічними засобами збору відеоінформації в зоні його польоту, засобами передачі відеоінформації пілоту та засобами зв'язку з пілотом для дистанційного керування польотом FPV-дрона. Пілот в свою чергу повинен мати засоби прийому та візуалізації відеоінформації та засоби дистанційного керування польотом.

Конструкція літакового типу (Plane) може використовувати лише один мотор, який може бути двигуном на рідкому паливі чи електричним. Проте ця конструкція має ряд недоліків, які ускладнюють реалізацію FPV-дрона на їх основі. Наприклад, розташування мотора. В одномоторних літальних апаратах мотор з гвинтом розташовують в носовій частині. Але в FPV-дроні в носовій частині доцільно розташувати відеокамеру, тоді мотор прийдеться розташувати в хвостовій частині, або використовувати два мотори, що розташовуються на крилах. Це ускладнює конструкцію дрона. Інший недолік – це потреба в механічних елементах на крилах та в хвостовій частині для забезпечення керованості такого дрона. Це знову ж таки ускладнює механічну частину конструкції дрона, бо для управління такими механізмами потрібно використовувати складні сервоприводи.

Більш привабливими з позиції реалізації FPV-дронів є конструкції коптерного типу. Давно відомою є конструкція гвинтокрила (ще називають гелікоптер), що показана на рис.1.1 в нижньому рядку зліва. У цій конструкції **1** підйом і переміщення в повітрі забезпечується несучим гвинтом, що обертається в горизонтальній площині. Несучий **1** гвинт – пристрій, що **1** призначений для створення підйомної сили. З точки зору аеродинаміки немає жодних принципових відмінностей між крилом літака та несучим гвинтом. Лопасті несучого гвинта мають несиметричний профіль і в результаті їх руху відносно повітря створюється підйомна сила. При цьому фюзеляж вертольоту залишається на місці [7].

1 Гвинт, що обертається, створює значний реактивний обертальний момент, тобто фюзеляж гвинтокрила буде обертатись в сторону, протилежну до напрямку обертання несучого гвинта. Виникнення реактивного обертального моменту можна пояснити як результат виконання закону збереження моменту імпульсу. Наглядно це можна пояснити на прикладі повороту якого-небудь плавзасобу на воді (рис. 1.2). Веслуємо в одну сторону – плавзасіб повертає в іншу.

1 Рисунок 1.2 – Ілюстрація роботи несучого гвинта

1 Компенсувати його можна створивши такий же обертальний момент, проте направлений в протилежний бік. Тоді фюзеляж обертатись не буде. Реактивний обертальний момент необхідно якось компенсувати (важко керувати гвинтокрилом, який постійно обертається). Обертальний 1 момент в такій конструкції

1 компенсується за допомогою хвостового гвинта, що кріпиться до хвостової балки і створює тягу вбік.

1 Як і у випадку з літаковим типом конструкції розглянута конструкція є складною з позиції реалізації механічної частини: лопаті несучого гвинта повинні змінювати свій нахил для гнучкого керування польотом такого гвинтокрила.

Більш привабливими для реалізації FPV-дронів є багатороторні конструкції, які мають від трьох до восьми моторів з гвинтами, як показано на рис. 1.1. Найбільш поширеними є FPV-дрони квадрокоптерного (мають чотири мотори з гвинтами) та гексакоптерного (мають шість моторів з гвинтами) типів [8]. Очевидно, що такі конструкції можуть базуватися виключно на електричних моторах і повинні мати акумуляторну батарею відповідної потужності для їх живлення. В багатороторних конструкціях переважно використовуються гвинти з трьома лопатями і мають жорстку конструкцію, що робить їх простими в реалізації. Багатороторна конструкція дозволяє здійснювати вертикальний зліт дрона, а керування польотом забезпечується шляхом певного алгоритму зміни швидкості обертання моторів. Зауважимо, що гвинти на моторах, які на рис. 1.1 показані жовтим і голубим кольорами, обертаються у взаємно протилежному керунку.

Приклади реалізації FPV-дронів

На рис. 1.3 представлений FPV-дрон квадрокоптерного типу GEPRC Vapor-X5 HD O4 Pro PNP.

Рисунок 1.3 – FPV-дрон GEPRC Vapor-X5 HD O4 Pro PNP

GEPRC Vapor-X5 HD O4 Pro PNP – це високоякісний дрон, що виготовлений з легких та міцних матеріалів. Він оснащений відеопередавачем DJI O4 Air Unit Pro VTX та іншими передовими технологіями, які забезпечують стабільний та швидкий політ. Завдяки діагоналі між центрами моторів 230мм, потужним двигунам GEPRC SPEEDX2 2207E 1960 KV та 3-лопатеvim гвинтам Gemfan, він забезпечує чудові польотні характеристики [9]. Дрон оснащений передовим польотним контролером GEP-F722-HD V2 і змонтований на 5-ти дюймовій рамі GEP-Vapor-X5 O4 Pro з Wide-X конструкцією, що обладнана швидкозмінними променями для легкого демонтажу та обслуговування. Цей дрон призначений для зйомок високої якості. Його вартість складає 23270 грн.

Приклад FPV-дрону гексакоптерного типу ілюструє рис. 1.4.

Рисунок 1.4 – FPV-дрон гексакоптерного типу Diatone KN-106

Гексакоптер Diatone KN-106, завдяки шести променям з моторами, має збільшену вантажопідйомність та противагу вітру. Політний контролер MAMBA MK4 F405 MINI, що використовується у цьому дроні, забезпечує легкість управління, стабільність та точну реакцію на керування. Дрон оснащений KN H1 камерою, Y-подібною антеною, безщітковими моторами та ELRS915 приймачем.

Гексакоптера Diatone KN-106 має наступну комплектацію:

Рама розміром десять дюймів, що має шість променів;

Польотний контролер MAMBA MK4 F405 MINI, що забезпечує керування польотом;

Контролер обертів KN 60A 6S;

Безщіткові мотори KN 3214 730KV;

Відеокамера Caddx KN H1 забезпечує високу якість зображення;

Відеопередавач KN5,8 ГГц; 2,5Вт забезпечує дальність передачі зображення до 20 км;

Y-подібна антена KN 150 мм відеопередавача;

Радіоканал ELRS915 МГц/868 МГц.

Гексакоптера Diatone KN-106 забезпечує наступні експлуатаційні характеристики:

Максимальна швидкість підйому 10 м/с;

Максимальна швидкість спуску 18 м/с;

Максимальна швидкість польоту 120 км/год.;

Максимальна вага навантаження 6000 грам;

Максимальний час польоту 31 хвилина;

Максимальна висота польоту 7000 м;

Колісна база 540 мм;

Габаритні розміри 660 x 580 x 95 мм;

Діапазон робочих температур від -20°C до +50°C;

Вартість 25995 грн.

Як бачимо польотні характеристики гексакоптера Diatone KN-106 є достатньо високими, зокрема такі як: вага навантаження до 6000 грам, висота польоту до 7000 метрів, швидкість польоту до 120 кілометрів в годину, дальність передачі зображення до 20 кілометрів.

АНАЛІЗ ТРАКТУ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ FPV-ДРОНА

Типова структура тракту керування двигунами FPV-дрона

Типова структура тракту керування двигунами FPV-дрона представлена на рис.2.1.

Рисунок 2.1 – Типова структура тракту керування двигунами FPV-дрона

Керування польотом FPV-дрона здійснює пілот, користуючись пультом керування. Зв'язок між пультом керування і дроном здійснюється через канал зв'язку яким у нашому випадку є радіоканал. Команди керування сприймає мікропроцесор польотного контролера дрону, який на основі отриманих команд у нашому випадку здійснює керування швидкістю обертання двигунів. Очевидно, що контролером швидкості обертання двигунів FPV-дрона буде слугувати електронний пристрій, характеристики якого будуть визначатися кількістю та типом електричних двигунів, що використовуються в дроні **11 з одного боку, та** типом польотного контролера, сигнали керування якого повинен сприймати контролер швидкості обертання двигунів . Відповідно до завдання на дипломний проєкт наш дрон повинен бути квадрокоптерного типу, тобто повинен мати чотири двигуни.

Важливо визначитися з конструкцією електронного контролера швидкості обертання двигунів. Поширеною є конструкція електронних контролерів швидкості обертання двигунів, коли кожний двигун має свій індивідуальний контролер швидкості обертання. **11 Останнім часом зростає тенденція до використання групових** контролерів типу чотири в одному, коли один контролер забезпечує керування чотирьом двигунами. Кожний з розглянутих підходів має як позитивні так і негативні сторони.

Якщо взяти за основу варіант з індивідуальним контролером швидкості обертання для кожного двигуна, то це має перевагу в ремонтпридатності такого дрону тому, що при виході з ладу одного з контролерів його легше замінити. У випадку використання групового контролера вихід з ладу одного з контролерів потребує заміни цілого блоку контролерів, що, зазвичай, буде більш вартісним.

З іншого боку використання групових контролерів спрощує конструкцію рами,

дозволяє зробити її більш компактною.

На рис.2.2 представлена конструкція дрона квадрокоптерного типу, в якій використовуються індивідуальні контролери швидкості обертання для кожного двигуна [11].

Рисунок 2.2 – Конструкція дрона квадрокоптерного типу з індивідуальними контролерами швидкості обертання для кожного двигуна

Як бачимо з рисунку рама квадрокоптера є достатньо громіздкою, а також ускладнюється монтаж силових ланцюгів дрона.

На рис.2.3 представлена конструкція дрона квадрокоптерного типу, в якій використовується груповий контролер один для чотирьох двигунів[11] .

Рисунок 2.3 – Конструкція дрона квадрокоптерного типу з одним груповим контролером для чотирьох двигунів

Як бачимо з наданого рисунку використання групового контролера суттєво покращує конструкцію дрона як в плані компактності його рами та і в плані монтажу силових ланцюгів.

Електричні двигуни для FPV-дрона

Очевидним здавалося би використання в FPV-дронах електричних двигунів постійного струму, позаяк дрони такого типу живляться від акумуляторів, тому розглянемо можливі варіанти використання електричних двигунів різних типів у дронах. Серед двигунів постійного струму відомі двигуни щіткового типу, безщіткового типу і крокові [12, 13].

Щітковий двигун є найпростішим типом двигуна постійного струму. `

Рис. 2.4 ілюструє загальний принцип роботи щіткового двигуна [12].

Рисунок 2.4 – Загальний принцип роботи щіткового двигуна

Щітковий двигун має нерухому частину – статор (Stator), яку утворюють магніти S і N, та рухому частину – ротор (Rotor), яку утворюють котушки (Coil). У цьому типі двигуна електричний струм проходить через котушки, розташовані в постійному магнітному полі. Струм генерує магнітні поля в котушках, що змушує вузол котушок обертатися, оскільки кожна котушка відштовхується від однойменного полюса та притягується до різноіменного полюса постійних магнітів. Для підтримки обертання необхідно постійно змінювати напрямок струму, щоб полярність котушок постійно змінювалася, змушуючи котушки продовжувати «переслідувати» різноіменні фіксовані полюси. Живлення до

котушок подається через нерухомі провідні щітки (Brush), які контактують з обертовим комутатором (Commutator) – саме обертання комутатора викликає зміну напрямку струму через котушки. Комутатор і щітки є ключовими компонентами, що відрізняють щітковий двигун постійного струму від інших типів двигунів. Щіткові двигуни є достатньо простими в реалізації, проте наявність щіток робить їх вразливими з позицій надійності.

Розглянемо принцип дії безщіткових двигунів постійного струму. У цих двигунах котушки утворюють нерухому частину – статор (Stator), а постійні магніти утворюють рухому частину – ротор (Rotor). Функції щіток у таких двигунах виконує електронний комутатор. Двигуни такого типу можуть бути однофазними, двофазними та трифазними [13]. Найчастіше використовуються трифазні безщіткові двигуни. Функцію щіток в цих двигунах виконують електронні силові комутатори. Конструкцію трифазного безщіткового двигуна ілюструє рис. 2.5 [12].

Рисунок 2.5 – Загальний принцип роботи безщіткового двигуна

Статор такого двигуна має три котушки, що сполучені одними кінцями своїх виводів всередині двигуна, а інші три виводи цих котушок використовуються для подачі на них напруги через силові комутатори. Таке сполучення котушок має назву зірки.

Магніти ротора і обмотки статора забезпечують обертання двигуна. Вони притягуються один до одного протилежними полюсами і відштовхуються однаковими полюсами. Подібний процес відбувається і в щітковому двигуні постійного струму. Істотна відмінність полягає в способі комутації струму, що подається на дрітні обмотки. Як вже було сказано вище цю функцію виконують силові комутатори, які будуються на потужних MOSFET транзисторах – величина струму в котушках може сягати десятків Ампер. Зазвичай такі комутатори реалізуються у вигляді мостових схем: кожний зовнішній вивід котушки повинен перемикатися за певним алгоритмом між позитивним та негативним полюсами джерела живлення. У трифазному безколекторному двигуні таку функцію виконує трифазний комутатор.

Треба також зауважити, що в безколекторних двигунах потрібно контролювати положення ротора при його обертанні, щоби визначати моменти перемикання котушок. У трифазних двигунах зміна фази повинна відбуватися через кожні 120° повороту ротора. Існують різні методи визначення положення ротора. Це можуть бути датчики, наприклад, датчик Холла чи оптичний датчик, а можуть бути і бездатчикові методи, наприклад, метод, що базується на визначенні моменту пікового значення сили зворотного електромагнітного випромінювання (EMF) шляхом його вимірювання. Як бачимо безщіткові двигуни постійного струму є суттєво складнішими від щіткових двигунів і потребують застосування електронних компонентів, в тому числі

обчислювальних засобів для реалізації складних алгоритмів керування [13, 14].

У підсумку безщіткові двигуни постійного струму у порівнянні з щітковими двигунами постійного струму чи асинхронним двигунами змінного струму мають багато переваг [13], це:

Вища ефективність і надійність;

Нижчий рівень акустичного шуму;

Менші габарити і вага;

Краща динамічна реакція.

Саме завдяки цим властивостям безщіткові двигуни, не зважаючи на більш високу складність, знайшли своє застосування в FPV-дронах [11, 13].

Функції контролера швидкості обертання двигунів FPV-дрона

Контролер швидкості обертання двигунів FPV-дрона повинен забезпечувати функції запуску, зупинки, реверсування напрямку обертання та **5 регулювання швидкості обертання і крутного моменту двигуна**, а також виконувати функції керування електронними комутаторами та контролю положення ротора безщіткового двигуна BLDC (Brushless DC – безщітковий двигун постійного струму) [14].

Типовий комутатор котушок двигуна має схему напівмостової або напів-Н-мостової схеми. На відміну від Н-моста, ця конфігурація схеми має лише два перемикачі – один транзистор високого рівня та один транзистор низького рівня.

Більшість безщіткових двигунів використовують дво- або трифазні системи живлення. Тому на схемі контролера двигуна BLDC це виглядатиме як два або три напівмости (залежно від кількості фаз) з парою перемикачів кожен.

На рис. 2.6 представлена схема керування трифазним BLDC двигуном.

Рисунок 2.6 – Схема керування трифазним BLDC двигуном

5 Як бачимо з рисунку для комутування кожної з трьох обмоток трифазного двигуна використовується пара MOSFET транзисторів, один з яких (верхній у парі) сполучує котушку з позитивним полюсом джерела живлення +V, а інший (нижній у парі) сполучує котушку з негативним полюсом джерела живлення GND. Керування перемиканням транзисторів комутатора забезпечують драйвери (Fet Driver на схемі). Зважаючи на складність функцій керування двигунами FPV-дрона виникає потреба у використанні мікроконтролерів для реалізації цих функцій. Ці функції може виконувати польотний

контролер FPV-дрона або мікроконтролери в складі контролерів швидкості обертання двигунів .

Статор має три фазні обмотки, розташовані під кутом 120° одна до одної. Кожна обмотка має векторне представлення напруги та струму, що подаються на статор. Датчики Холла контролера BLDC-двигуна визначають положення ротора. Отримавши дані датчика, потужні MOSFET-транзистори перемикають струм, подаючи його у відповідні обмотки. Вмикання чи вимикання транзисторів здійснюють драйвери затворів, які діють як посередники між перемикачами та мікроконтролером (MCU).

Процес керування трифазним двигуном BLDC включає шість кроків, необхідних для завершення повного циклу перемикання (тобто для живлення всіх трьох обмоток статора). Вмикаючи та вимикаючи транзистори, що сполучують вивід обмотки з позитивним чи негативним полюсами джерела живлення, струм протікає через обмотки статора послідовно [12].

Рис. 2.7 ілюструє послідовність перемикання котушок трифазного BLDC двигуна протягом одного оберту. Обертання підтримується шляхом постійного перемикання магнітного потоку, щоб постійний магніт постійно переслідував обертове магнітне поле, індуковане котушками. Іншими словами, живлення U, V та W необхідно постійно перемикати, щоб результуючий потік постійно рухався, створюючи обертове поле, яке постійно притягує магніт ротора. В таблиці, що на рисунку, показана послідовність перемикання фаз: у другій колонці котушки, назва яких вказана зліва, підключаються до позитивного полюсу, а котушки, назва яких вказана справа, підключаються до негативного полюсу джерела живлення. У третій колонці показано зміну положення ротора двигуна.

Рисунок 2.7 – Послідовність перемикання котушок трифазного BLDC двигуна

Як бачите, послідовне перемикання режимів з 1 по 6 призведе до того, що ротор повернеться **5 за годинниковою стрілкою на** один оберт. Швидкість обертання можна контролювати, контролюючи швидкість зміни фаз.

Під час проєктування контролера двигуна BLDC інженери можуть використовувати різні способи комутації струму, включаючи трапецієподібну та синусоїдальну комутацію. Назви пов'язані з формами хвиль сигналу.

Трапецієподібний метод простіший, але на низьких швидкостях він схильний викликати вібрацію в двигуні.

Синусоїдальна комутація, навпаки, стає складною на високих швидкостях. Зазвичай схема контролера синусоїдального безщіткового двигуна використовує широтно-

імпульсну модуляцію (ШИМ). Вона допомагає регулювати струм, **5** що подається в обмотки ротора, та виконувати процес комутації більш плавно та ефективно. Це особливо стосується контролерів із замкнутим циклом, які отримують зворотний зв'язок щодо вихідного сигналу та регулюють вхідну потужність, змінюючи шпаруватість.

ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ТРАКТУ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ

FPV-ДРОНА

Вибір рами FPV-дрона

Рама є елементом FPV-дрона, на який монтуються всі компоненти, що входять до його складу: двигуни, польотний контролер, один або декілька контролерів швидкості обертання двигуна, відеокамера, відеопередавач, плата радіоканалу, антени, батарея живлення тощо. Основним параметром рами, від якого залежать параметри інших компонентів, є її розмір, що визначається в дюймах. Типовими для FPV-дронів є розміри від трьох до десяти дюймів, це: три, чотири, п'ять, сім, вісім і десять дюймів. Відповідно до завдання на дипломний проєкт дрон повинен мати розмір сім дюймів. Розглянемо деякі поширені на ринку України варіанти семидюймових рам, зовнішній вигляд яких показано на рис. 3.1, а характеристики представлені у табл. 3.1.

а) б) в)

Рисунок 3.1 **5** – Зовнішній вигляд семидюймових рам:

а) Mark4-7inch; б) APEX HD; в) Kharak-7.3

Як видно на рисунку рами мають подібну конструкцію з вузькими променями, що розраховано на використання групових контролерів швидкості обертання двигунів типу чотири в одному. Рами, що розраховані на використання індивідуальних контролерів швидкості обертання двигуна зазвичай мають широкі промені, на яких розташовуються контролери. Промені в цих рамах мають різну товщину і ширину і, як видно з рис. 3.1 та характеристик у табл. 3.1, чим більша товщина променів тим вони вужчі.

Таблиця 3.1 – Характеристики семидюймових рам FPV-дронів

Назва

Mark4-7inch

APEX HD

Kharak-7.3

Розмір пропеллерів

7 дюймів

7 дюймів

7 дюймів

Маса, г

121

155

165

Міжмоторна відстань, мм

295

295

295

Розміри, мм

193x223

-

Довжина коропусу, мм

180

-

160

Товщина верхньої пластин, мм

3,0

2,0

2,0

Товщина нижньої пластин, мм

3,0

2,5

3,0

Товщина променів, мм

5,0

5,5

6,0

Монтажні отвори, мм

30,5x30,5

30,5x30,5

30,5x30,5

Матеріал

Карбон

Карбон

Карбон

Виробник

Китай

Китай

Україна

Вартість, грн.

972

887

1280

5 Як бачимо з таблиці розглянуті рами мають близькі характеристики і можуть бути використані для реалізації FPV-дронів. Всі розглянуті рами виготовлені з легкого і міцного матеріалу карбону. Важливими для FPV-дронів є міцність і жорсткість конструкції. Ми зупинили свій вибір на рамі українського виробника марки Kharak, хоч вона є дещо дорожчою.

3 Рами торгової марки Kharak є українською розробкою 2024 року, в яких ураховуються й виправляються різні недоліки китайських аналогів. Ці рами є покращеними версіями рам Source One, та мають ряд нововведень:

3 Рама має 3 три гвинти на промінь для їх кріплення, що підвищує її жорсткість;

3 Хрестоподібна пластина рами з отвором 4мм по центру для можливості додавання клею у випадку наявності люфта після збірки також 3 підвищує жорсткість рами;

3 Завдяки симетричній формі, промені стали незначно ширшими, що робить їх більш міцними;

3 За рахунок скорочення передньої частини рами, додано місце позаду, що дає можливість з легкістю встановити VTX;

3 Внаслідок збільшення відстані між монтажними гвинтами стеку і задніми стійками, стало зручніше прокладати кабелі живлення моторів.

3 Вибір двигунів

Як було зроблено висновки на основі аналізу різних типів електродвигунів у другому розділі для використання у FPV-дронах найкращим варіантом є застосування без щіткових електричних двигунів. Перш ніж перейти до вибору типу двигунів для нашого FPV-дрона розглянемо типові характеристики двигунів такого типу.

Безщіткові електродвигуни 4 мають своє маркування, зазвичай це 4 цифри – діаметр і довжина статора. Для прикладу візьмемо електродвигун iFlight XING2 1806 FPV Motor Unibell (1600KV) 6S для квадрокоптера (див. 4 рис.3.2). Це безколекторний електродвигун 4 постійного струму, розроблений для радіокерованих FPV квадрокоптерів чи 4 інших літальних апаратів. 4 Маркування 1806 говорить нам про те, що діаметр статора становить 18 мм, а його довжина складає 6 мм.

Рисунок 3.2 – Маркування безколекторного двигуна

4 Наступним йде значення кількості обертів двигуна на 1 Вольт напруги. В даному випадку на 1В 4 припадає 4 1600 об/хв. Це значення досягається без навантаження. Використовуючи пропелер або інший елемент, швидкість обертання зміниться в меншу сторону.

4 Ще один важливий параметр, який обов'язково вказується в паспортних даних, це напруга живлення, наприклад, запис 3-6S 4 – вказує на кількість елементів (осередків) в підключеному літєвому акумуляторі. Номінальна напруга одного елемента складає 3,7 В, 12 таким чином діапазон робочої напруги такого електродвигуна буде складати від 11,1 В до 22,2 В.

Не менш важливим є параметр, який вказує на тягу двигуна. Наприклад, такий запис в паспортних характеристиках "Max. thrust 2640 g on 6s" вказує на те, що даний двигун здатний розвинути максимальну тягу 2640 грам при живленні від батареї 6s. Є правило, яке вказує на те, що сумарна тяга, яку розвивають усі двигуни дрона, повинна не менше ніж вдвічі перевищувати масу дрона у повному спорядженні [15]. 2 Вище співвідношення тяги до ваги дає квадрокоптеру більшу маневреність і прискорення, але може зробити його складнішим в управлінні. Проте, навіть для відносно повільних і стабільних польотів, наприклад, при аерофотозйомках, 2 співвідношення тяги до ваги може 2 бути 2 3:1 або навіть 4:1. Це не тільки забезпечить кращий контроль, але й залишить місце для додаткового корисного навантаження [15].

Ще один параметр, який можуть вказувати у параметрах двигунів – це кількість магнітів, яка впливає на потужність двигуна. Наприклад, запис 12N14P означає кількість магнітів. В даному випадку 12 це 2 кількість електромагнітів (полюсів) у статорі, а цифра 2 14 вказує 2 на кількість постійних магнітів у роторі. Кількість полюсів безпосередньо впливає на продуктивність двигуна. Якщо полюсів менше, ви можете використовувати більше заліза в статорі, що призведе до більшої вихідної потужності. Однак більша кількість полюсів призводить до більш рівномірного розподілу магнітного поля. Це, в свою чергу, забезпечує більш плавну роботу двигуна з більш точним контролем над обертанням дзвону (дзвін – так називають корпус двигуна) [15].

Серед безщіткових електродвигунів, які є доступними на нашому ринку і можуть бути ефективними для роботи в складі семидюймового FPV-дрона квадрокоптерного типу є дві моделі, які заслуговують уваги, це двигун EMAX ECOII2807-1300KV і двигун T-Motor F90 2806.5 1300KV [16, 17]. Зовнішній вигляд цих двигунів представлений на рис. 3.3, а технічні характеристики представлені в табл. 3.2.

а) б)

Рисунок 3.3 5 – Зовнішній вигляд безщіткових двигунів:

а) EMAX ECOII2807-1300KV; б) T-Motor F90 2806.5 1300KV

В табл. 3.2, з метою порівняння характеристик, також представлені параметри двигунів, що орієнтовані на застосування в дронах інших типорозмірів. Двигун EMAX ECOII3115 640KV орієнтований на застосування в десятидюймових дронах. 5 Як бачимо з таблиці

характеристик цей двигун має найбільшу потужність та забезпечує значно більшу тягу у порівнянні з іншими моделями двигунів, проте параметр KV та кількість обертів за хвилину при 50-процентному значенні тяги є найменшим. Це означає, що такі двигуни будуть забезпечувати високі характеристики по параметрах потужності та тяги дрона але динамічні параметри будуть нижчими. Окрім цього цей двигун потребує вищої напруги живлення (в межах від 22,2 В до 29,6 В) та струму споживання. Для таких двигунів характерними також є більші габарити і маса. Максимальні характеристики потужності та тяги можуть бути забезпечені при максимальному значенні напруги живлення та відповідній ємності батареї живлення.

Таблиця 3.2 – Характеристики безщіткових двигунів

Назва

EMAX ECOII3115

640KV

EMAX ECOII2207

2400KV

EMAX ECOII2807

1300KV

T-Motor F90 2806.5 1300KV

Розмір пропелерів, дюйм

10

5

6-7

7

KV

640

2400

1300

1300

Максимальна тяга, г

5010

1580

2640

2360

Кількість елементів батареї живлення (Li-Po)

6-8S

3-4S

3-6S

3-6S

Пікове значення

струму, А

63

43

52

45

Максимальна

потужність, Вт

2016

720

1310

1059

Кількість обертів за 1 хв. при 50% тяги

10170

21000

14600

Дані відсутні

Число магнітів

12N14P

12N14P

12N14P

12N14P

Габаритні розміри, мм

37,3x48,65

27,5x33,2

33,9x33,8

33,4x34,7

Маса, г

106

33,5

47,6

46,6

Різьба вихідного валу

M5

M5

M5

M5

Довжина проводів, мм

270

120

200

230

Монтажні отвори, мм

19x19 (МЗ)

16x16 (МЗ)

19x19 (МЗ)

19x19 (МЗ)

Вартість, грн.

1176

546

790

1370

Двигун EMAX ECOII2207 2400KV орієнтований на застосування в п'ятидюймових дронах. Цей двигун має найвище значення параметру KV=2400 обертів при зміні напруги на один вольт, що визначає чутливість до зміни швидкості обертів. Цей параметр є майже вдвічі меншим у двигунів, що орієнтовані на застосування в семидюймових дронах та майже в чотири рази менший у двигуна, що орієнтований на застосування в десятидюймових дронах. У цього двигуна менші значення потужності і тяги, менші напруга живлення струм споживання, менші габаритні розміри і маса, проте завдяки високому значенню параметра KV він забезпечує найкращі динамічні параметри. На це вказує і параметр, що визначає кількість обертів за одиницю часу при п'ятдесяти процентному навантаженні, що складає для цього двигуна 21 тисячу обертів за хвилину, в той час як для інших розглянутих двигунів цей параметр є значно нижчим. Очевидно, що такий дрон повинен бути легким і не може застосовуватися для переміщення значних навантажень.

Представлені в табл. 3.2 двигуни, що орієнтовані на застосування в семидюймових дронах, мають близькі значення параметрів, тому я зупинив свій вибір на двигуні EMAX ESOII2807 1300KV, який має нижчу вартість у порівнянні з двигуном T-Motor F90 2806.5 1300KV.

Реалізація контролера швидкості обертання двигунів FPV-дрона

У другому розділі пояснювальної записки до дипломного проєкту ми розглянули основні вимоги до контролера швидкості обертання двигунів FPV-дрона і вказали, що це обов'язково є електронний пристрій, зважаючи на те, що в FPV-дронах зазвичай використовують безщіткові електродвигуни, які потребують електронних контролерів. Для таких пристроїв в технічній літературі поширеною є скорочена назва ESC, що означає "Електронний контролер швидкості" (Electronic Speed Controller). Це електронний пристрій, який контролює швидкість та напрямок обертання електродвигунів у FPV-дронах та інших рухомих засобах [18].

На основі викладеного вище аналізу тракту керування двигунами FPV-дрона та з урахуванням вибраних компонентів, а саме рами і двигунів, сформулюємо вимоги до характеристик ESC проєктованого дрона, це:

Розмір рами – сім дюймів;

Тип ESC контролера – чотири в одному;

Батарея живлення з числом елементів 3-6S;

Пікове значення струму для одного двигуна, не менше 52 А;

Отвори для кріплення на раму 30,5x30,5мм М4;

Вбудований мікроконтролер для кожного з чотирьох двигунів;

Підтримка прошивки Bluejay через ESC Configurator;

Сумісність з польотним контролером.

Аналіз ринку контролерів швидкості обертання двигунів показує їх достатню різноманітність як в окремому виконанні так і в груповому, зокрема у варіанті чотири в одному [18]. Такі пристрої продукуються як у вигляді окремих пристроїв так і в парі з польотним контролером. Для нашого дрону ми обрали другий варіант як такий, що найкраще дозволяє забезпечити перераховані вище вимоги. Ми зупинили свій вибір на комплекті SpeedyBee F405 V4 7 BLS 55A 30x30 Stack, до складу якого входить польотний контролер 7 SpeedyBee F405 V4 Flight Controller та контролер швидкості SpeedyBee BLS 55A 4-in-1 ESC [19].

Контролер швидкості SpeedyBee BLS 55A має такі основні характеристики:

Постійний струм – 55A x 4;

Піковий струм – 70A(10сек);

Присутній діод захисту від перепадів напруги живлення;

7 Зовнішній конденсатор 1000uF Low ESR (в комплекті);

Тип батареї живлення – 3-6S LiPo;

Наявний датчик контролю струму;

Прошивка: BLHeli_S J-H-40;

ESC Протокол – DSHOT300/600;

Підтримка конфігуратора – <https://esc-configurator.com/>;

Монтажний розмір – 30,5x30,5 7 мм (діаметр отворів 4мм);

Габаритні розміри – 45,6x44,8 мм;

Маса – 23,5 г.

Як бачимо з наведених характеристик цей контролер повністю відповідає нашим вимогам.

Контролер швидкості обертання двигунів SpeedyBee BLS 55A представляє собою багатoshарову плату, на якій, завдяки використанню малогабаритних мікросхем високого ступеню інтеграції та інших компонентів для поверхового монтажу, реалізовані чотири ідентичні контролери для незалежного керування швидкістю обертання чотирьох безколекторних двигунів. Структурна схема одного з чотирьох таких контролерів представлена на рис. 3.4.

Рисунок 3.4 – Структурна схема контролера швидкості обертання для одного двигуна в складі плати SpeedyBee BLS 55A 4-in-1

До складу кожного з контролерів входить напівмостовий трифазний комутатор, який безпосередньо перемикає обмотки двигуна, драйвер, який формує необхідні рівні сигналів керування для транзисторів комутатора на основі отриманих від мікроконтролера стандартних логічних сигналів, схему визначення положення ротора та мікроконтролер, який реалізує алгоритм керування двигуном на основі команд, отриманих від польотного контролера.

Розглянемо окремі компоненти цієї структурної схеми.

Напівмостовий трифазний комутатор, зважаючи на значні струми (порядку 55 А), які він повинен комутувати, реалізується на дискретних MOSFET (англ. metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, скорочено "MOSFET") транзисторах.

Схема напівмостового трифазного комутатора представлена на рис. 3.5.

Для комутування кожної з трьох обмоток двигуна використовується два транзистори: верхній по схемі транзистор підключає обмотку до позитивного полюсу джерела живлення, а нижній транзистор до негативного полюсу. Таку схему називають напівмостовою. В кожний момент часу до джерела живлення підключеними є дві обмотки – одна до позитивного полюсу, а інша до негативного. Порядок перемикання обмоток такою схемою ми розглядали у другому розділі.

У схемі напівмостового трифазного комутатора контролера швидкості обертання двигунів SpeedyBee BLS 55A 4-in-1 ESC, який ми вибрали для нашого FPV-дрону, використовуються MOSFET транзистори HYG011N04, які забезпечують струм комутації до 320 А в діапазоні робочої напруги до 40 В [20].

Рисунок 3.5 – Схема напівмостового трифазного комутатора на дискретних MOSFET транзисторах HYG011N04

Корпус цього транзистора призначений для поверхневого монтажу і на нижній частині має металеву пластину для відводу тепла (див. рис. 3.6).

Рисунок 3.6 – Корпус транзистора HYG011N0

Як вже було сказано вище керування транзисторними ключами комутатора забезпечує драйвер. В контролері швидкості обертання двигунів SpeedyBee BLS 55A 4-in-1 ESC використовуються мікросхеми драйверів SA6288 [21]. Одна така мікросхема забезпечує керування одним напівмостовим трифазним комутатором, який, в свою чергу керує одним трифазним безколекторним двигуном. Структурна схема мікросхеми SA6288 представлена на рис. 3.7.

Рисунок 3.7 – Структурна схема мікросхеми драйвера SA6288

Зліва на структурній схемі показані входи HIN1,2,3 для подачі сигналів керування верхніми транзисторами комутатора та входи LIN1,2,3 для подачі сигналів керування нижніми транзисторами комутатора. Ці сигнали поступають від мікроконтролера. Сформовані мікросхемою сигнали поступають на виходи HO1,2,3 і LO1,2,3, через які подаються на відповідні входи транзисторів комутатора.

Відповідно до параметрів MOSFET транзисторів HYG011N04 комутатора, якими керує драйвер, їхнє порогове значення напруги між заслоном і витком, при якій транзистор відкривається, складає $V_{GS(th)} = 3 \text{ В}$, а максимальне допустиме значення складає не більше 20 В. Для надійного закривання транзисторів значення напруги між заслоном і витком транзистора має бути рівним нулю, тобто $V_{GS} = 0 \text{ В}$. Драйвер формує сигнали керування таким чином, щоби транзистори комутатора надійно відкривалися і закривалися.

Зауважимо, що для нижніх транзисторів сигнали керування формуються відносно шини нульового потенціалу, до якої підключені витки нижніх транзисторів комутатора. Оскільки витки верхніх транзисторів підключені до відповідних обмоток двигуна, то для верхніх транзисторів опорою служить напруга на відповідних обмотках двигуна, яка поступає на входи VS1,2,3 мікросхеми драйвера SA6288 з комутатора (див. рис. 3.5).

Ще один важливий компонент структури контролера – це мікроконтролер.

Його функції включають керування швидкістю двигуна, зв'язок з контролером польоту, надання телеметричних даних, керування світлодіодами тощо. Ці функції реалізуються програмою (поширений термін «прошивка»), яка після програмування мікроконтролера зберігається в його енергонезалежній пам'яті. В контролері швидкості обертання двигунів SpeedyBee BLS 55A 4-in-1 ESC використовуються мікроконтролери EFM8BB2 фірми Silicon Labs [22].

Мікроконтролер EFM8B2 має такі характеристики:

Ядро CIP-51, що працює на частоті до 50 МГц;

Три внутрішні генератори (49 МГц, 24,5 МГц та 80 кГц);

16 КБ флеш-пам'яті, перепрограмовуваної в системі;

2304 байти оперативної пам'яті (включаючи 256 байтів стандартної 8051 оперативної пам'яті та 2048 байтів вбудованої XRAM);

Шина SMB;

Ведений інтерфейс I2C;

SPI інтерфейс;

Два інтерфейси UART;

Триканальна програмована матриця лічильників (ШІМ, генерація тактової частоти, захоплення/порівняння);

П'ять 16-бітних таймерів;

Два аналогові компаратори;

Дванадцятибітний аналого-цифровий перетворювач з інтегрованим мультиплексором, джерелом опорної напруги та датчиком температури;

Завантажувач UART.

Мікроконтролер оснащений вдосконаленим ядром CIP-51, повністю сумісним по набору інструкцій зі стандартним MCS-51 ядром. Це дозволяє використовувати 8 при розробці програмного забезпечення стандартні x51-орієнтовані асемблери та компілятори мов високого рівня, зокрема копілятор C-51 для мови Сі. Як бачимо з наведених вище характеристик мікроконтролерне ядро CIP-51 має значний 8 набір периферійних вузлів, що робить його зручним для різноманітних застосувань.

Отже, ми розглянули компоненти структурної схеми контролера швидкості обертання для одного двигуна в складі контролера SpeedyBee BLS 55A 4-in-1 ESC, який містить чотири таких контролери на монтажній платі. Вигляд верхньої сторони плати SpeedyBee BLS 55A 4-in-1 ESC представлений на рис. 3.8.

Рисунок 3.8 – Вигляд верхньої сторони плати SpeedyBee BLS 55A 4-in-1 ESC

Цифрами 1, 2, 3 і 4 на платі показано розташування контактних площадок для пайки дрітків від двигунів – цифра вказує на номер двигуна. Для кожного з двигунів відводиться три площадки, адже двигуни трифазні. Крім цього на нижній по рисунку стороні плати розташовані дві контактні площадки для пайки кабелю подачі живлення на дрон від батареї живлення та фільтруючого конденсатора. Полярність цих контактів показана відповідними знаками плюс «+» та мінус «-». Також між вказаними двома контактами розташована біла стрілочка, яка вказує на правильне розташування контролера на рамі – це напрямок прямолінійного руху дрона. На центральній частині плати розташований радіатор для відведення тепла від силових ключів, частина з яких розташована під радіатором.

Вигляд зворотної сторони плати SpeedyBee BLS 55A 4-in-1 ESC представлений на рис. 3.9.

Рисунок 3.9 – Вигляд зворотної сторони плати SpeedyBee BLS 55A 4-in-1 ESC

На рисунку ми бачимо розташування основних інтегральних компонентів, це: MOSFET транзистори HYG011N04, частина з яких розташована на верхній стороні плати, чотири мікросхеми драйверів SA6288, чотири мікросхеми мікроконтролерів EFM8BB2, а також рознім для підключення кабелю зв'язку ESC контролера з польотним контролером.

МОНТУВАННЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ КОНТРОЛЕРА

ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНІВ FPV-ДРОНА

Монтування контролера швидкості обертання двигунів fpv-дрона

Монтування дрона розпочинається зі збірки рами. Для монтажу карбонової рами використовуються гвинти М3 та М4, які поставляються в комплекті з елементами рами. Гайки в більшості випадків є вмонтовані в елементи конструкції рами. Рами зазвичай поставляють у вигляді наборів елементів в незібраному стані. Для надійного кріплення елементів рами за допомогою гвинтів використовують фіксатор різьби синього кольору, що забезпечує хорошу фіксацію різьбових з'єднань і разом з тим робить раму ремонтпридатною. Власне через фактор ремонтпридатності не рекомендується використовувати червоний фіксатор різьби, після застосування якого буде неможливо відкручувати гвинти. Після завершення монтування нижньої частини рами перед початком монтажу компонентів на раму необхідно перевірити жорсткість кріплення променів рами.

На рис. 4.1 представлена зібрана нижня частина семидюймової рами Kharak-7.3 проєктованого дрона, що підготовлена до монтажу компонентів.

Рисунок 4.1 – Нижня частина рами проєктованого дрона,
що підготовлена до монтажу компонентів

Монтаж компонентів потрібно розпочинати зі встановлення на раму двигунів, які кріпляться відповідними гвинтами. В комплект поставки двигуна входить два набори гвинтів різної довжини. Справа в тому, що при кріпленні двигуна з нижньої сторони променя під двигунами часто встановлюють капронові підкладки для амортизації ударів об землю при посадці дрона. Такі підкладки як правило друкують на 3D-принтері і можуть поставлятися в комплекті з рамою. В комплект рами Kharak-7.3 входить набір підкладок для двигунів, кріплення для відеокамери та кріплення для антен. Всі ці компоненти надруковані з капрону на 3D-принтері.

Під час монтажу двигунів треба звернути увагу на те, як гвинти заходять в різьбові отвори нижньої частини корпусу двигуна: вони повинні для надійного кріплення повністю зайти в отвір з різьбою але не мають виступати настільки, щоби зачіпати котушки чи рухому частину корпусу. Кожний двигун кріпиться до рами чотирьома гвинтами.

На рис. 4.2 показана рама нашого дрона зі встановленими на неї двигунами.

Рисунок 4.2 – Нижня частина рами проєктованого дрона

зі встановленими на неї двигунами

Я монтував двигуни з використанням підкладок до них і використав набір довших гвинтів, що входили в комплекти двигунів. Після повного затягування гвинтів кожного з двигунів всі гвинти повністю заповнили різьбові отвори, а виступи гвинтів на верхній стороні променів, до яких кріпляться двигуни, не перебільшував одного міліметра. Зазор між торцями гвинтів і котушками та рухомою частиною двигунів складав порядку 5 мм. При монтуванні двигунів я також використовував фіксатор різьби синього кольору.

Наступний етап – це встановлення на раму контролера швидкості обертання двигунів та припаювання до його контактних площадок дротів від двигунів, кабелю, що подає на дрон живлення від батареї і електролітичного конденсатора, який служить фільтром для живлення і монтується на ті ж контактні площадки контролера швидкості обертання двигунів, що і кабель живлення.

На рис.4.3 показана нижня частина рами проєктованого дрона зі встановленим на неї контролером швидкості обертання двигунів і припаяними до неї дротами від двигунів, кабелем живлення та конденсатором.

Рисунок 4.3 – Нижня частина рами проєктованого дрона зі змонтованим на неї контролером швидкості обертання двигунів

На рисунку нижній ліворуч двигун має номер 1, нижній праворуч має номер 2, верхній ліворуч має номер 3, а верхній праворуч відповідно номер 4. Оскільки ESC контролер і відповідне програмне забезпечення підтримують функцію реверсу для двигунів, то дроти кожного з двигунів можна паяти в довільному порядку на відведені для них площадки. Потрібний напрямок обертання двигуна можна змінити програмно.

Особливістю пайки дротів, що йдуть від двигунів, є те, що вони достатньо товсті, а площадки до яких вони припаюються є відносно великими, тому паяння потрібно виконувати паяльником потужністю біля (40-50) Вт з достатньо товстим жалом при температурі (400-450)°С. Паяння кабелю живлення, який має ще товстіші дроти, потребує ще вищої температури, а саме в межах (450-500)°С. При паянні кабелю живлення і фільтруючого конденсатора необхідно звернути увагу на полярність дротів кабелю та конденсатора: на платі контролера біля відповідних контактів вказана їх полярність знаками «+» та «-». Також треба врахувати те, що на тильній стороні рами під кабелем живлення і конденсатором має бути закріплений відео передавач та його антена, а також може кріпитися і антена радіоканалу. Тому, перед тим як починати розпаювання кабелю і конденсатора потрібно змодельовати розташування цих компонентів.

Програмування контролера швидкості обертання двигунів frv-дрона

Зазвичай контролери швидкості обертання двигунів поставляються з якоюсь стандартною прошивкою. У нашому випадку це прошивка BLHeli_S, яка є вже дещо застарілою. Контролери швидкості обертання двигунів, як і польотні контролери, допускають перепрошивку певними програмними засобами. У нашому випадку перепрограмування може бути виконане через плату польотного контролера, на якій встановлений USB-порт для зв'язку з комп'ютером. В нашій конструкції дрона плата польотного контролера встановлюється над контролером швидкості обертання двигунів, яка має аналогічні габаритні розміри і монтажні отвори. Контролер швидкості обертання двигунів підключається до польотного контролера через восьмиконтактний кабель, який вставляється у відповідний рознім на платі контролера швидкості обертання двигунів (див. рис.4.3 праворуч), а іншою стороною кабель підключається до аналогічного розніму на платі польотного контролера.

На рис. 4.4 показано вигляд проєктованого дрона зі встановленим польотним контролером.

Рисунок 4.4 – Вигляд проєктованого дрона зі встановленим

польотним контролером

Ліворуч на рисунку видно кабель, який сполучує польотний контролер з контролером обертів ESC.

Через цей кабель від контролера швидкості обертання двигунів на польотний контролер подається напруга живлення плюс п'ять вольт, яка формується відповідним понижуючим стабілізатором з напруги батареї 22,2 В. Напруга +5 В забезпечує живлення польотного контролера, а також периферійних пристроїв, які підключаються до нього.

Ще чотири жили кабелю забезпечують зв'язок польотного контролера з кожним з чотирьох мікроконтролерів на платі контролера швидкості обертання двигунів, які керують відповідними двигунами. Ці лінії працюють в режимі передавач-приймач з використанням протоколу UART. Мікроконтролер польотного контролера виступає в ролі передавача, а контролер швидкості обертання двигунів є приймачем.

В режимі перепрограмування контролера швидкості обертання двигунів мікроконтролер польотного контролера забезпечує почерговий зв'язок кожного з чотирьох мікроконтролерів контролера швидкості обертання двигунів через відповідну лінію каналу UART та свій USB-порт з комп'ютером, що реалізує функцію перепрограмування контролера швидкості обертання двигунів з використанням відповідного програмного середовища конфігуратора.

В режимі польоту мікроконтролер польотного контролера приймає від пульта керування польотом команди керування швидкістю обертання двигунів і передає ці команди на відповідні мікроконтролери контролера, використовуючи ті ж самі лінії каналу UART.

Тепер повернемося до питання перепрограмування контролера швидкості обертання двигунів. Прошивка BLHeli_S, яка встановлена виробником – це друге покоління прошивки BLHeli, розробленої спеціально для контролерів з 8-бітними мікроконтролерами.

Прошивка BLHeli_S більше не оновлюється, оскільки фокус розробки змістився на новішу BLHeli_32, проте контролери з новою прошивкою є дорожчими. Для підтримки обладнання, що постачається з прошивкою BLHeli_S, з'явилися кастомні прошивки, що пропонують передові функції та продуктивність, порівнянну з найновішими та дорожчими контролерами рівня енергії BLHeli_32. Яскравим прикладом є прошивка Bluejay, яку рекомендують встановити на заміну прошивки BLHeli_S [11]. Прошивка Bluejay є вільно доступною через онлайн web утиліту під назвою Esc-configurator [23].

Протоколи ESC визначають швидкість сигналу двигуна між контролером польоту (FC) та ESC. Ось список протоколів ESC, які зазвичай використовуються в FPV-дронах, упорядкованих від найстарішого до найновішого:

Стандартний ШИМ;

Oneshot125;

Oneshot42;

Multishot;

DShot (DShot150, DShot300, DShot600).

DShot має різні швидкості, що позначені числом в кінці назв. Вибрана швидкість залежить від частоти контуру PID (Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання), встановленої в Betaflight.

Для частоти 2 кГц/1,6 кГц використовується DShot150, для частоти 4 кГц/3,2 кГц використовується DShot300 і для частоти 8 кГц використовується DShot600.

Важливим є те, що протокол DShot підтримує функцію програмного реверсу двигуна.

Отже, для перепрограмування нашого SpeedyBee BLS 55A 4-in-1 ESC ми скористалися онлайн web утилітою Esc-configurator, яка дозволяє перепрошити наш контролер прошивкою Bluejay, яка підтримує фільтрацію RPM та двонаправлений Dshot.

RPM-фільтрація у FPV означає використання інформації про оберти двигунів, отриманої від електронних контролерів швидкості (ESC) через двосторонній DSHOT, для фільтрації шуму, що виникає від роботи мотора в датчиках гіроскопу. Вона допомагає зменшити вібрації та покращити стабільність польоту.

Для прошивки потрібно виконати такі кроки:

Зняти усі пропелери з дрона;

Подати живлення на дрон від батареї та підключити до комп'ютера за допомогою кабелю USB Type-C, що розташований на платі контролера польоту;

Відкрити браузер Chrome і перейти на веб-сайт <https://www.esc-configurator.com/>;

У вікні конфігуратора (див. Рис. 4.5) вибрати послідовний порт та активувати з'єднання дрона, натискаючи фішку Connect;

Прочитати конфігурацію дрона, вибираючи функцію Read Settings – конфігуратор повинен визначити тип контролера, а саме, чотири в одному;

Вибрати тип прошивки Bluejay;

Запустити функцію прошивки Flash All ESCs (див. Рис. 4.6).

Рисунок 4.5 – Вікно конфігуратора перед активуванням з'єднання

Рисунок 4.6 – Вікно конфігуратора перед запуском прошивки

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	chota.plast.org.ua	2.4%
2	autosclad.com.ua	1.6%
3	broniamykolaiv.com.ua	1.5%
4	modelistam.com.ua	1.5%
5	essuir.sumdu.edu.ua	0.5%
6	spec-rental.com.ua	0.4%
7	bezpeka-shop.com	0.3%
8	ela.kpi.ua	0.3%
9	duikt.edu.ua	0.3%
10	vgi.com.ua	0.3%
11	mnau.edu.ua	0.2%
12	patonmed.com.ua	0.1%
13	docplayer.net	0.1%



Дякуємо, що перевірили
свій документ за допомогою
Plag!