

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський)

Проектування та дослідження системи  
програмного керування роботом  
на базі STM32  
(тема)

Виконав:  
студент \_\_\_\_\_ П \_\_\_\_\_ курсу, групи \_\_\_\_\_ КСМм-22-1  
Внуков О.О.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність \_\_\_\_\_  
123 «Комп'ютерна інженерія»  
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма \_\_\_\_\_  
Комп'ютерні системи та мережі  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: \_\_\_\_\_ доц. Піскарьов О.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

\_\_\_\_\_ Коваленко А.А.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

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

Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютерні системи та мережі \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студенту \_\_\_\_\_ Внукову Олександр Олександровичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування та дослідження системи програмного керування роботом на базі STM32

затверджена наказом по університету від “ 06 ” листопада 2023 р. № 1298 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 15 січня 2024 р.

3. Вхідні дані до роботи 1) квадрокоптер; 2) SolidWorks; 3) MATLAB.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

1) побудова комп'ютерної моделі безпілотного літального апарату

2) розробка алгоритму управління квадрокоптером

3) моделювання динамічної моделі БПЛА

4) проведення експериментальних досліджень;

5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Слайд-презентація – 14 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд конструкції БПЛА	07.11.23-13.11.23	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	14.11.23-20.11.23	
3	Вибір інструментальних засобів	21.11.23-23.11.23	
4	Розробка моделі БПЛА	24.11.23-06.12.23	
5	Проведення експериментів	07.12.23-23.12.23	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	26.12.23-02.01.24	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	10.01.24-13.01.24	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	13.01.24-15.01.24	

Дата видачі завдання 06 листопада 2023 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Піскаръов О.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 74 с., 41 рис., 3 табл., 1 дод., 17 джерел.

БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, КВАДРОКОПТЕР, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ПРОГРАМНІ ПАКЕТИ, СИГНАЛ, ЗД-МОДЕЛЬ.

Метою кваліфікаційної роботи є створення комп'ютерної моделі безпілотного літального апарату (БПЛА) у формі квадрокоптера. Для досягнення цієї мети використовуються програмні пакети SolidWorks та SimMechanics/MATLAB. Динамічна модель квадрокоптера буде побудована за допомогою методу візуально-орієнтованого програмування в середовищі SimMechanics. Паралельно з цим розробляється алгоритм управління, спрямований на забезпечення необхідної стабілізації та можливості утримуватися на заданій висоті під впливом горизонтальних повітряних потоків.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено дослідження, які переконливо підтверджують ефективність використаних методів для аналізу динаміки польоту безпілотних літаючих апаратів, зокрема квадрокоптерів. Отримані результати свідчать про потенційні можливості для подальшого вдосконалення цих методів з метою покращення роботи таких апаратів.

## ABSTRACT

Master's thesis: 74 pages, 41 figures, 3 tables, 1 appendices, 17 sources.

UNMANNED AIRCRAFT, QUADROPTER, MATHEMATICAL MODEL, SOFTWARE PACKAGES, SIGNAL, 3D MODEL

The major goal of this thesis is to create a computer model of an unmanned aerial vehicle (UAV) in the form of a quadcopter. To achieve this goal, SolidWorks and SimMechanics/MATLAB software packages are used. The dynamic model of the quadrotor will be built using the method of visual-oriented programming in the SimMechanics environment. At the same time, a control algorithm is being developed to ensure the necessary stabilization and the ability to stay at a given altitude under the influence of horizontal air flows.

In order to studies were carried out to confirm the suitability of these approaches to studying the flight dynamics of an unmanned aerial vehicle (quadcopter) with the prospect of their improvement.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	7
ВСТУП .....	8
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ .....	10
1.1 Безпілотні мультироторні літальні апарати .....	10
1.2 Базові принципи польоту квадрокоптера .....	13
1.3 ПД-регулятори .....	16
1.4 Польотний контролер .....	20
2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ .....	24
2.1 Існуючі мультироторні системи та їх недоліки .....	24
2.2 Типи двигунів та особливості їх керування .....	26
2.2.1 Колекторний електродвигун .....	27
2.2.2 Існуючі модулі управління.....	29
3 СКЛАД ЕЛЕМЕНТІВ БПЛА НА ПРИКЛАДІ КВАДРОКОПТЕРА .....	35
3.1 Компоненти БПЛА.....	35
3.2 Принципи обробки інформації з датчиків квадрокоптера.....	39
4 МОДЕЛЬ РУХУ В ПРОСТОРІ КВАДРОКОПТЕР .....	50
4.1 Розробка моделі квадрокоптера в cad-системі solidworks та трансляція моделі у simscape multibody.....	50
4.2 Результати моделювання.....	59
ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	65
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ  
І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

PWM – широтно-імпульсна модуляція

APM – моніторинг продуктивності додатків

CAD – система автоматизованого проектування

UART – універсальний асинхронний приймач

## ВСТУП

На сучасний момент сектор безпілотних літальних апаратів (БПЛА) активно прогресує. Вони виконують різноманітні завдання як у військовій, так і у цивільній сферах, охоплюючи широкий спектр функцій.

Останнім часом мультироторні безпілотні літальні апарати (мультикоптери) здобули велику популярність завдяки їх доступності та простоті в експлуатації. Їх використовують для різноманітних завдань, таких як доставка вантажів, відзняття фото і відео, пошукові операції, спостереження за природними явищами та інші сфери.

Потреба у легких, економічних пристроях, які можуть бути висококомобільними і виконувати різноманітні завдання, спричинила розвиток безпілотних літаючих апаратів. Ці апарати з успіхом застосовуються в різних галузях діяльності людини.

Квадрокоптери визначалися як одні з перших вертольотів, що здійснили взліт та змогли виконувати польоти. У 1922 році Георгій Ботезату створив та успішно випробував перший квадрокоптер. Тим не менше, ці апарати мали свої недоліки, зокрема, громіздку трансмісію, яка передавала обертання одного мотора на кілька гвинтів. Виникнення хвостового гвинта та автомата перекошу дозволило подолати ці труднощі. Хоча нові розробки квадрокоптерів з'явилися у 1950-х роках, прогрес у цій технології тривалий час залишався обмеженим після тестових зразків.

На сьогоднішній день доступно різноманіття безпілотних літальних апаратів, які можуть бути забезпечені моторами або бути безмоторними, такими як планери та повітряні змії. Серед моторних апаратів, найбільш популярні квадрокоптери..

Мультикоптер – це безпілотний літальний апарат, складений з чотирьох несучих гвинтів, що обертаються діагонально в протилежних напрямках.

Такі апарати, відомі як мультикоптери, можуть також мати будь-яку кількість несучих гвинтів.

На самому початку історії вертольотобудування мультикоптери виникли як одна з форм вертольотів. Проте їхній подальший розвиток був обмежений технічними викликами, зокрема, складністю передачі обертання від одного двигуна на всі гвинти та потребою в реалізації системи перекосу, яка б була характерною для класичних вертольотів.

У ХХІ столітті мультикоптери отримали новий поштовх розвитку, коли їх почали використовувати як безпілотні літальні апарати (БПЛА). Це стало можливим завдяки розвитку авіаційних технологій, включаючи ефективніші легкі матеріали, потужніші батареї та вдосконалені системи автономії та дистанційного управління.

Безпілотні мультикоптери отримали широке застосування в різних сферах, включаючи фото- та відеозйомку, аграрну техніку для моніторингу сільськогосподарських угідь, а також у рятувальних операціях, наукових дослідженнях і навіть у сфері розваг..

Мультикоптери мають маленький розмір, легкі, дуже маневрені, відносно дешеві і прості у використанні. Ці якості дають можливість використовувати ці літальні апарати в рятувальній службі, дослідницьких роботах, доставці дрібногабаритних вантажів і т.і.

Однак, головна проблема мультикоптерів полягає в низькій тривалості польоту через малу ємність батареї. Багато мультикоптерів мають безколекторні електродвигуни, які витрачають енергію швидко. Ця проблема зменшує можливість широкого застосування мультикоптерів у різних галузях, оскільки середній час польоту на одній зарядці батареї складає близько 20 хвилин, що є недостатньою тривалістю польоту.

Застосування безпілотних мультикоптерів стало можливим через їхню високу маневреність, простоту управління та можливість автономної роботи.

## 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

### 1.1 Безпілотні мультироторні літальні апарати

Квадрокоптер, що є підтипом мультикоптера, представляє собою літальний апарат, який споруджений за гелікоптерною схемою та обладнаний чотирма гвинтами, що несуть чотири гвинти.

Багатовінтові вертольоти були розроблені в ранні роки історії вертольотобудування. Один із перших квадрокоптерів, який зміг фактично відірватися від землі та триматися у повітрі, був створений Георгієм Ботезатом і протестований у 1922 році. Недоліками цих апаратів була складна трансмісія, що передавала обертання одного мотора на кілька гвинтів. Винахід хвостового гвинта та автомата перекошу поживив край цим спробам.

Відновлення досліджень у галузі мультикоптерів розпочалося в 1950-ті роки, але на той час робота не вдалася далеко за межі прототипів.

Справжній прорив стався лише в XXI столітті, коли мультикоптери придбали нове життя як безпілотні апарати. Простота конструкції квадрокоптерів сприяла їх широкому застосуванню в аматорському моделюванні. Крім того, вони виявились зручними для доступної аерофото та кінозйомки, оскільки громіздку камеру можна було виносити із зони дії гвинтів. та кінозйомки - громіздку камеру винесено із зони дії гвинтів.

Квадрокоптери, оснащені чотирма гвинтами постійного кроку (без автомата перекошу, відмінно від одно- та двогвинтових апаратів), мали кожен гвинт приводжений в рух власним двигуном. Половина гвинтів оберталася за годинниковою стрілкою, а інша половина - проти, що усуває необхідність у хвостовому гвинті. Маневруванням керували зміною швидкості обертання гвинтів [1].

Для забезпечення стабільного утримання у повітрі, мультикоптери обов'язково оснащуються трьома гіроскопами, які вимірюють кутові швидкості та фіксують крен апарата.

Як допоміжний інструмент, іноді, також використовується акселерометр, дані від якого дають змогу процесору встановлювати абсолютно горизонтальне положення, і бародатчик, який дає змогу фіксувати апарат на потрібній висоті. Також, застосовують сонар для автоматичної посадки й утримання невеликої висоти, а також для обльоту перешкод.

Крім того, для автоматичної посадки та утримання стабільної висоти, а також для обходу перешкод, можуть використовуватися сонарни сенсори. Сонарни сенсори вимірюють час, який затрачає звуковий сигнал на проліт від апарата до поверхні, і на його основі визначають відстань до об'єктів. Це дає можливість мультикоптеру автоматично реагувати на перешкоди та дотримуватися встановленої висоти під час польоту.

Сучасні мультикоптери використовують безколекторні електродвигуни та літій-полімерні акумулятори як джерело енергії, що призводить до обмежень у їхніх польотних характеристиках. Типова маса таких апаратів зазвичай коливається від 1 до 4 кг, і час польоту становить від 10 до 30 хвилин (в окремих випадках може досягати 30-50 хвилин). Корисний вантаж, який може піднімати середньорозмірний мультикоптер, розташовується в діапазоні від 500 г до 2-3 кг, що дозволяє підняти в повітря невелику фото-або відеокамеру.

Існують значно більші моделі мультикоптерів, які мають від 6 до 8 роторів (гекса- та октокоптери), і вони можуть піднімати в повітря вантажі вагою до 20-30 кг. Для збільшення вантажопідйомності використовується співвісне розташування несучих роторів. Наприклад, гексакоптер має 12 моторів і 12 пропелерів, які розташовані попарно на 6 несучих променях. Мультикоптери такого типу можуть розвивати швидкість польоту від нуля (нерухоме висіння в точці) до 100-110 км/год.

Запас енергії батарей дозволяє окремим моделям мультикоптерів летіти на відстань до 7-12 км. Проте, на практиці радіус дії, тобто максимальна відстань, на яку вони можуть відлітати з подальшим поверненням у точку зльоту, зазвичай обмежений прямою видимістю (100-200 м за умови ручного керування) або дальністю дії апаратури радіокерування та відеолінку.

Найкращі зразки такої апаратури використовують підсилювачі потужності радіосигналу та систему спрямованих антен, що дозволяє забезпечити стабільне радіокерування та відеолінк на відстані до 100 км. Таким чином, основним обмеженням є саме час польоту мультикоптерів [2].

Квадрокоптер складається з кількох важливих компонентів, і без більшості з них стабільний політ є неможливим. По-перше, це польотний контролер, який обробляє всю отриману інформацію і видає відповідні сигнали для двигунів. Зазвичай контролер отримує вхідну інформацію у формі цифрового сигналу з широтно-імпульсною модуляцією.

Для повного контролю над рухом у повітрі використовуються чотири основні канали: газ, ристання, тангаж і крен. У деяких польотних контролерах передбачено використання різних режимів польоту, що дозволяє використовувати додаткові канали вхідного сигналу. Крім того, контролери обладнані датчиками, які надають інформацію про положення апарата в повітрі. Використовуючи ці дані, контролер автоматично коригує вихідний сигнал для забезпечення стабільності та точності управління..

Після обробки сигналу таким чином, щоб отримати відповідні величини напруг, пропорційні швидкості кожного з чотирьох гвинтів, сигнал подається на ПД-регулятор. Цей ПД-регулятор, також широтно-імпульсно промодульований, контролює сигнал великої потужності, який безпосередньо подається на двигун. Така система дозволяє ефективно керувати обертанням кожного гвинта для забезпечення стабільності та точності управління [3].

В більшості випадків його інтерфейс керування квадрокоптером складається із чотирьох основних каналів керування:

- керування потужністю роботи усіх двигунів;
- нахил по горизонталі вперед та назад;
- нахил по горизонталі вправо та вліво;
- поворот вздовж осі Z.

Стандартний контролер отримує сигнал від радіоприймача та передає його безпосередньо на двигуни. Це проста та надійна логіка з невеликою кількістю факторів, які можуть вплинути на стабільність роботи.

Проте такий підхід не забезпечує сталого положення у повітрі, що вимагає постійної стабілізації від оператора. Штатна система ефективна лише в зоні прямої видимості, що обмежується приблизно 50-60 метрами. Цього не достатньо, наприклад, для виконання завдань, пов'язаних з відеозйомкою ландшафту.

## 1.2 Базові принципи польоту квадрокоптера

Квадрокоптер включає в себе кілька ключових компонентів, і без більшості з них стабільний політ є неможливим. По-перше, це польотний контролер, який опрацьовує всю отриману інформацію і генерує сигнали для двигунів. Зазвичай контролер отримує вхідну інформацію у вигляді цифрового сигналу із широтно-імпульсною модуляцією.

Для повної орієнтації в повітрі достатньо чотирьох каналів: газ, ристання, тангаж і крен. Деякі моделі польотних контролерів також мають режими польоту, що додають додаткові канали до вхідного сигналу. До входів контролера також приєднані датчики, які визначають положення апарата в повітрі.

Отримуючи інформацію від цих датчиків, контролер автоматично коригує вихідний сигнал для забезпечення стабільності та точності управління [3].

Після обробки сигналу таким чином, щоб на виході отримати відповідні величини напруг, пропорційні швидкості кожного з чотирьох гвинтів, виникає можливість здійснення політних маневрів.

Основні принципи польотів будь-якої техніки, включаючи квадрокоптери, визначаються аеродинамікою. Три осі обертання чітко визначають орієнтацію квадрокоптера в просторі та його напрямок руху, незалежно від положення самого апарата в повітрі.

Отриманий вихідний сигнал від контролера, також широтно-імпульсно промодульований, подається на ПІД-регулятор. Цей ПІД-регулятор керує сигналом великої потужності, який безпосередньо подається на двигун.

Така система керування дозволяє ефективно впливати на обертання кожного гвинта, забезпечуючи стабільність та точність управління апаратом..

Принципову схему роботи квадрокоптера можна побачити на рисунку 1.1.

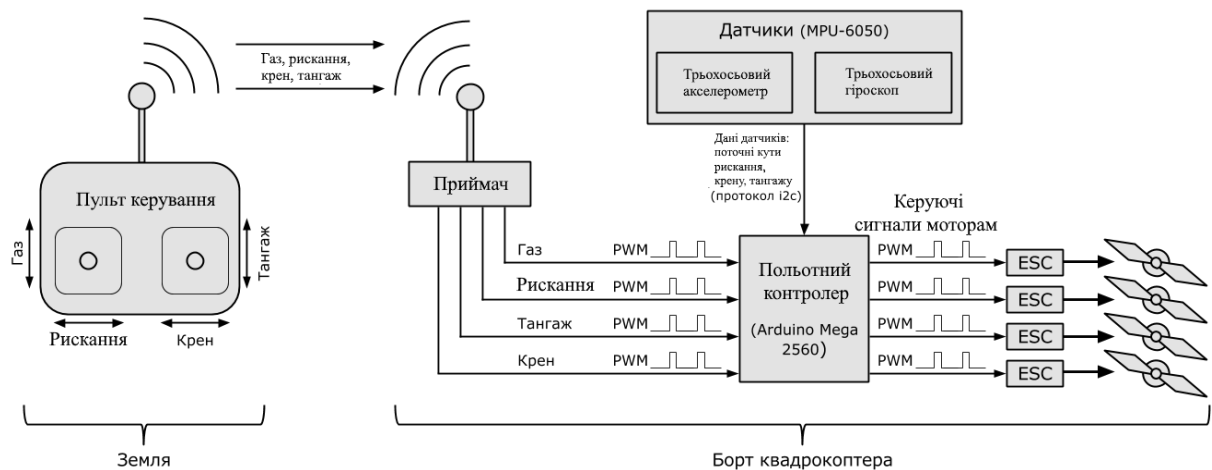


Рисунок 1.1 – Принципова схема квадрокоптера

Три перераховані вище осі або кути заведено правильно називати тангажем (pitch), креном (roll) і рисканням (yaw) що показано на рисунку 1.2.

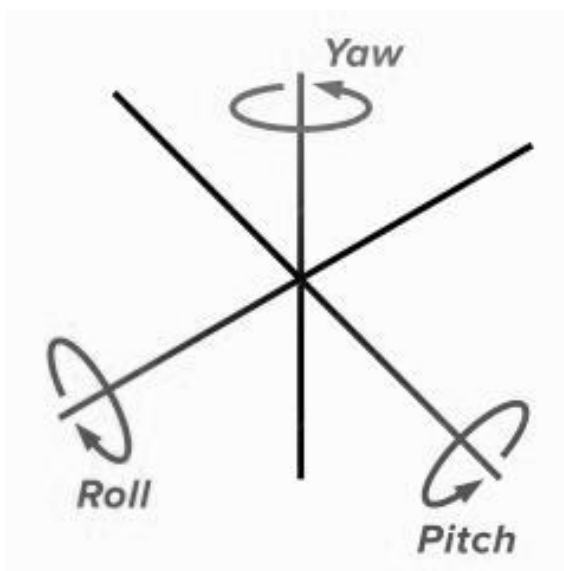


Рисунок 1.2 – Кути Ейлера – крен, тангаж та ристання

Під тангажем розуміють поворот апарата навколо поздовжньої осі, ристанням – навколо вертикальної осі, а креном – поздовжньої осі.

Якщо брати до розгляду гелікоптер, то його головний гвинт має вплив на тангаж і крен, а хвостовий компенсує обертовий момент, і від того, з якою швидкістю він обертається і в якому положенні перебуває, залежить нишпорення [3].

У випадку з квадрокоптером ситуація виглядає інакше. Тут маємо чотири гвинти, із яких два обертаються за годинниковою стрілкою, а два інші – у протилежному напрямку. Якщо всі гвинти мають однакову швидкість обертання, то всі характеристики будуть взаємно компенсовані. Проте, якщо швидкість обертання одного з гвинтів збільшиться, баланс порушиться. У відповідь на це, зменшення швидкості гвинта зі зворотнім напрямком обертання пропорційно може зберегти рівновагу, але може відбутися зміна тангажу або крену [1].

Якщо збільшити оберти одночасно на обох гвинтах, які обертаються в одному напрямку, і зменшити їх на інших, то зміниться кут нишпорення.

Управління обертанням гвинтів квадрокоптера, а отже, і їхньою швидкістю обертання, здійснюється через пульт дистанційного керування.

Під час розробки та створення квадрокоптера важливо провести всі необхідні розрахунки для досягнення оптимального балансу між масою апарата, потужністю встановлених двигунів та іншими факторами.

### 1.3 ПД-регулятори

Сигнал від польотного контролера не подається безпосередньо на двигун; замість цього, він передається на ПД-регулятор. Цей ПД-регулятор, враховуючи вхідний сигнал, визначає та видає відповідну напругу для керування двигуном. ПД-регулювання є необхідною технологією для ефективного управління квадрокоптером[2].

Наприклад, розглянемо ситуацію з дроном, якому потрібно повернутися на 60 градусів щодо центру мас. Для руху навколо центру мас потрібно надавати приводам необхідну кутову швидкість обертання. Для досягнення точного повороту на 60 градусів, кутову швидкість слід змінювати відповідно до конкретного закону. Коли різниця між поточним і необхідним кутами значна, кутова швидкість повинна бути великою. При зменшенні різниці швидкість повороту повинна також зменшуватися, досягаючи значення 0, коли різниця стає нульовою.

Проте, такий закон стає непрактичним для заздалегідь визначення, оскільки квадрокоптер має момент інерції, і може просто пролетіти через необхідне положення. У такому випадку довелося б подавати швидкість у зворотному напрямку.

Стандартне рішення в цьому випадку полягає в тому, щоб повідомляти необхідну швидкість як різницю між необхідним та поточним положенням, помножену на певну невід'ємну константу. Цей алгоритм відомий як ПД-регулятор. Важливо зазначити, що такий алгоритм має свій недолік: у випадку, коли необхідне кутове положення обертається із певною кутовою швидкістю, дрон може ніколи не наздоженути цю точку.

Рано чи пізно може настати момент, коли кутова швидкість, регульована ПД-регулятором, дорівнює кутовій швидкості обертання необхідного положення. Для ефективного вирішення цього завдання рекомендується комбінувати швидкість від П-регулятора із швидкістю, обчисленою як інтеграл за часом помилки за кутом, помножений на певну невід'ємну константу [4].

У такому випадку необхідна швидкість буде тим вищою, чим більше часу дрон витрачає на досягнення необхідного кутового положення. Цей алгоритм відомий як ПІ-регулятор.

Проте його також можна оптимізувати. Коли помилка за кутом досягне 0, дрон, піддаваючись впливу сил інерції, може пролетіти потрібне положення, якщо його швидкість до цього була достатньо великою.

Щоб уникнути подібних проблем, слід вживати заходів до того, як помилка досягне нуля. Зокрема, це включає в себе вживання гальмування з певною прискореною часткою, коли помилка ще невелика.

Цей процес досягається додаванням до потрібної швидкості від ПІ-регулятора похідної від помилки за часом, яка, в свою чергу, множиться на певну позитивну константу. Цей удосконалений алгоритм відомий як ПІД-регулятор, і його ілюстрація представлена на рисунку 1.3.

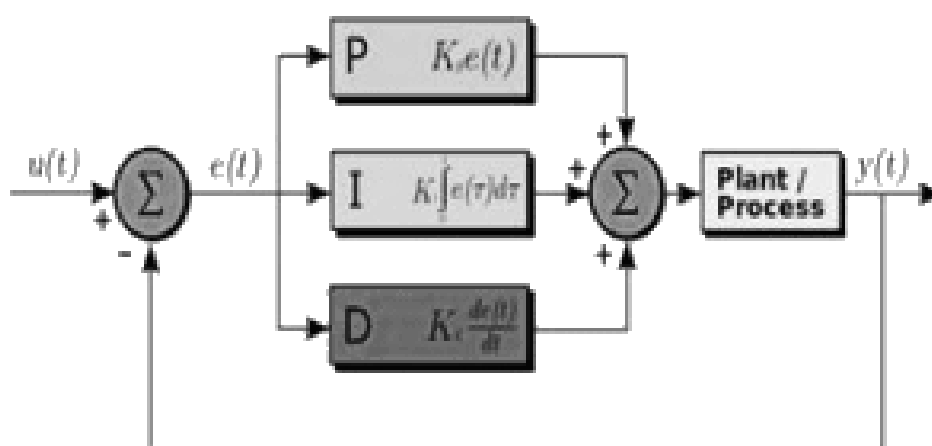


Рисунок 1.3 – Принципова схема ПІД-регулятора

У блоці process міститься опис об'єкта управління (його модель), у центральній частині схеми представлений сам регулятор, який відпрацьовує сигнал помилки (неузгодженості) даного сигналу і виміряного значення з об'єкта управління. Помилка в цій схемі надходить одночасно на всі три блоки паралельно, при цьому:

- у блоці P відбувається множення відповідного коефіцієнта пропорційної складової на величину помилки;
- у блоці I відбувається інтегрування помилки і множення отриманої величини на коефіцієнт  $K_i$ ;
- у блоці D відбувається диференціювання помилки з множенням на коефіцієнт  $K_d$ .

Рівняння ПІД регулятора:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$u(t)$  – вихідна величина регулятора;

$e(t)$  – сигнал неузгодженості (помилка);

P, I, D – пропорційна, інтегральна та диференціальна складові;

$K_p, K_i, K_d$  - коефіцієнти ПІД регулятора;

Поширеними є також такі модифікації рівняння ПІД регулятора:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Існує взаємозв'язок між коефіцієнтами, які входять у вирази, але відсутність загальноприйнятої системи параметрів майже завжди викликає плутанину. При заміні одного ПІД-регулятора іншим або при налаштуванні параметрів, це обов'язково має бути враховано.

Користуючись перетворенням Лапласа за нульових початкових умов, представимо передавальну функцію ПІД регулятора в операторній формі:

$$R(s) = K + \frac{1}{K_i s} + K_d s = K \left( 1 + \frac{1}{K K_i s} + \frac{K_d s}{K} \right)$$

На рисунку 1.4 представлені амплітудно-частотні (АЧХ) та фазо-частотні (ФЧХ) характеристики операторної передавальної функції. У низькочастотній області АЧХ і ФЧХ визначаються інтегральним членом, в середньочастотній області – пропорційним, а в високочастотній області – диференціальним [3].

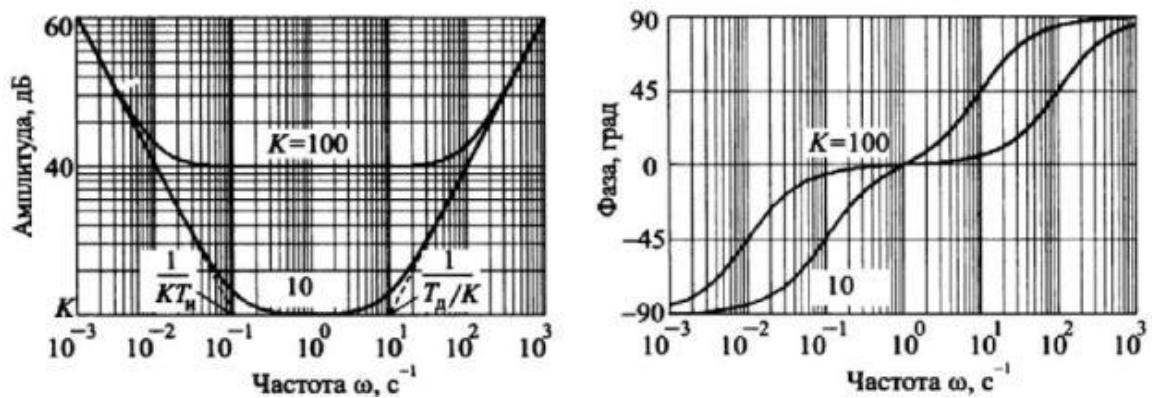


Рисунок 1.4 – АЧХ і ФЧХ ПІД-регулятора

Вигляд амплітудно-частотних (АЧХ) та фазо-частотних (ФЧХ) характеристик регулятора визначає його точність та резерв стійкості. З рисунка 1.4 можна зрозуміти, що при зменшенні інтегральної компоненти  $K_i$  спостерігається збільшення амплітуди коефіцієнта посилення регулятора на низьких частотах (під час наближення до сталого режиму), що, в свою чергу, призводить до зниження похибки "е".

З іншого боку, підвищення диференціальної компоненти  $K_d$  призводить до посилення на високих частотах, що призводить до збільшення шумів вимірювань та впливів зовнішніх завад, як показано на рисунку 1.5. Це

свідчить, що диференціальну складову використовують переважно для поліпшення форми перехідного процесу в системі, і часто її реалізація включає в себе фільтр високих частот (ФВЧ), щоб контролювати шуми та збурення.

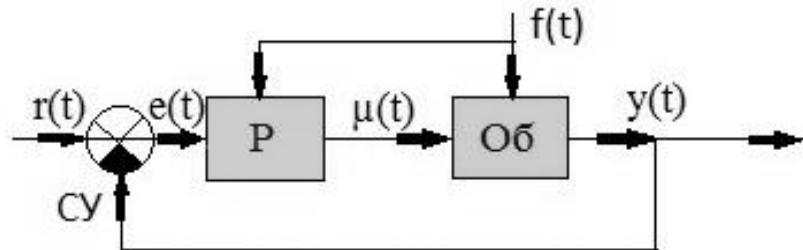


Рисунок 1.5 – ПІД-регулятор у системі з шумом і зовнішніми збуреннями  $f(t)$

Підвищення значення пропорційного коефіцієнта  $K$  призводить до збільшення посилення системи регулювання та поліпшення точності у всьому діапазоні частот. Однак при цьому запас за фазою та посиленням зменшуються, що може негативно впливати на ефективність та якість регулювання системи. [3]

Додатково, при подальшому збільшенні пропорційної складової  $K$  можуть виникнути періодичні коливання, які свідчать про втрату стійкості системи. Важливо відзначити, що вплив завад вимірювань і шуму зменшується зі зростанням значень посилення та пропорційного коефіцієнта.

#### 1.4 Польотний контролер

Польотний контролер – це основна електронна плата, відповідальна за операційну діяльність мультикоптера. Для обчислень та управління використовується мікроконтролер, яким часто бувають малопотужні моделі, такі як Atmega328, або більш продуктивні варіанти, наприклад, Atmega2560 чи ARM-контролери, такі як STM32.

До функцій польотного контролера належать:

- стабілізація апарата в повітрі;
- утримання висоти (за допомогою барометра) і позиції (за допомогою GPS);
- автоматичний політ по заданих заздалегідь точках (опціонально)
- передача на землю поточних параметрів польоту за допомогою модему або Bluetooth (опціонально);
- забезпечення безпеки польоту (повернення в точку зльоту в разі втрати сигналу, автопосадка);
- підключення додаткової периферії: OSD, світлодіодної індикації тощо.

Кількість доступних функцій польотного контролера залежить від наявної периферії на борту мультикоптера, і в бюджетних контролерах може бути обмежена.

Польотний контролер ArduPilot Mega, що використовується у даному проєкті, є повноцінним рішенням для БПЛА. Він підтримує радіокероване дистанційне пілотування, автоматичне керування за заздалегідь створеним маршрутом (політ за точками) і можливість двостороннього обміну телеметричними даними між бортом та наземною станцією (телефон, планшет, ноутбук, DIY). Крім того, контролер може вести журнал у вбудовану пам'ять.

ArduPilot Mega заснований на автопілоті APM 2.x, розробленому спільнотою DIY Drones і побудованому на відкритому програмному забезпеченні.

Це надає можливість перетворити будь-який апарат у самостійний засіб та ефективно використовувати його як для розважальних, так і для професійних завдань.

Особливості:

- 3 осьовий гіроскоп, акселерометр, магнітометр і високоточний барометр;

- система стабілізації з можливістю повітряної акробатики;
- утримання позиції за GPS, політ по точках і повернення на точку старту;
- можливість використання інфрачервоного датчика для обходу перешкод;
- підтримка ультразвукового датчика (sonar sensor) для автоматичного зльоту і посадки;
- автоматичне проходження за маршрутними точками;
- керування двигунами за допомогою ШІМ (PWM) з використанням дешевих регуляторів швидкості (ESC);
- власна система стабілізації для камери (функція контролера підвісу);
- радіозв'язок і телеметрія з борту;
- підтримка безлічі рам і конфігурацій апаратів;
- підтримка датчика рівня заряду батареї;
- настроювана світлова індикація під час польотів;
- сумісний з багатьма радіокерованими приймачами PWM і PPM сигналів;
- передання в реальному часі телеметричних даних;
- підтримка OSD телеметрії (накладення на відеопередачу телеметричних даних) використовуючи протокол MAVLINK;
- конфігурування точок польоту за допомогою Google Maps;
- бортова флеш пам'ять 16Мбіт для автоматичної реєстрації даних;
- цифровий компас працює на HMC5883L (до версії 2.5.2);
- 6 ступенів свободи в InvenSense акселерометрі, гіроскоп MPU-6000;
- контролер Atmel ATmega2560-16AU і ATMEGA32U-2 чіп для обробки і функції USB;
- можливе завантаження оновлень вбудованого програмного забезпечення та конфігурації.

Нижче описано деякі режими польоту, доступні контролеру:

- Stabilize – утримання горизонту;

- AltHold – утримання висоти;
- Loiter – "замри і тиняйся";
- Return-to-Launch – повернутися на точку старту;
- Auto – виконання заданого маршруту в автоматичному режимі;
- Acro – акробатика (вимкнення всіх стабілізаційних систем);
- Circle – обліт по колу заданого радіуса;
- Position – фіксація в повітрі з ручним газом зльоту;
- Land – автоматична посадка;
- Simple – "легкий" політ.

Безпілотні вертольотні літальні апарати (БПЛА) мають свої обмеження у продуктивності, проте у ряді випадків їх застосування може мати ряд переваг. Один із типових сценаріїв для використання вертольотних БПЛА – це моніторинг різних об'єктів, де квадрокоптери виступають одним із популярних видів вертольотних БПЛА.

Квадрокоптер – це мультикоптер із чотирма роторами, що відрізняється від вертольотів тим, що кожен ротор забезпечує підйомну силу, а його стабільність у повітрі є вищою.

Слід відзначити, що квадрокоптер – це складний технічний пристрій з динамікою, що не завжди моделюється та піддатливий впливу зовнішніх збурень. Управління квадрокоптером є захоплюючою темою як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки воно вимагає розв'язання ряду складних завдань.

Однією з ключових характеристик квадрокоптера є його крок ротора – відстань, яку ротор подолає за один повний оберт ( $360^\circ$ ) в повітрі.

## 2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

### 2.1 Існуючі мультироторні системи та їх недоліки

Квадрокоптер виявляється найбільш стійким серед розглянутих варіантів багатороторних систем. Завдяки чотирьом двигунам досягається більш ефективне керування системою. Такий підхід вважається оптимальним, оскільки збільшення кількості моторів практично не впливає на стабільність, але в той же час значно підвищує споживання електроенергії.

Приклад квадрокоптера наведено у рисунку 2.1.

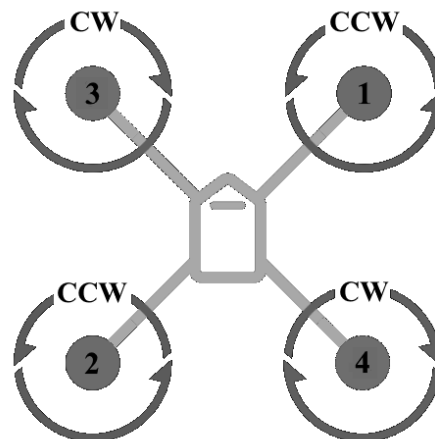


Рисунок 2.1 – Схема квадрокоптера

Завдяки своїй архітектурі та значній кількості потужних двигунів, мобільні об'єкти із декількома роторами можуть пересуватися на великих швидкостях та швидко змінювати напрямок, практично уникаючи виявлення з боку спостерігачів.

Це вказує на те, що система передачі та отримання сигналу повинна мати достатню потужність, щоб уникнути втрат сигналу на великих відстанях і забезпечити надійну передачу та прийом інформації. Особливо,

коли мова йде про бездротове з'єднання пристроїв, єдиним оптимальним варіантом є використання радіосигналів [4].

У таблиці 2.1 наведено найпопулярніші бездротові технології, які широко використовуються сьогодні.

Таблиця 2.1 – Опис радіостандартів

№	Стандарт	Частота	Опис
1	802.11 a	2,4 ГГц; 5 ГГц	Wi-Fi [5]
2	802.15.1	2,4 ГГц	Bluetooth [6]
3	802.15.4	2,4 ГГц	ZigBee
4	3GPP TS 45.005	40/20 МГц	GSM, LTE

З таблиці випливає, що найбільш поширені технології працюють на частоті сигналу 2,4 ГГц, що дозволяє передавати дані на значні відстані. Однак для роботи на відстані, такій як 1 кілометр, звичайних технологій виявляється недостатньо.

У домашніх мережах сьогодні широко використовується частота 5 ГГц, оскільки вища частота дозволяє досягти більшої швидкості передачі даних. Проте, слід зауважити, що із зростанням частоти сигнал швидше загасає і втрачає свою енергію. У мобільних мережах можлива передача інформації на великі відстані, але для цього необхідна ліцензія. Таким чином, звичайних технологій, які використовуються в нашому звичайному оточенні, недостатньо для ефективної реалізації цього проекту.

Для розв'язання цієї задачі слід звернутися до провідних виробників радіоапаратури для радіокерованих пристроїв. Кожен з них використовує власний стандарт передачі даних, який є запатентованим і включає в себе ряд заходів захисту від перешкод, інтерференції та інших сигналів на їхній власній частоті.

Досвід підтверджує, і виробники стверджують, що використання пар передавачів і приймачів від одного виробника може забезпечити надійний сигнал на відстані від 100 метрів до 10-15 кілометрів.

Деякі з цих систем також включають можливість відправки зворотного сигналу від приймача до передавача, передаючи інформацію про стан об'єкта.

Цей процес відомий як телеметрія і дозволяє отримувати додаткові дані про віддалені об'єкти. Деякі з найпоширеніших протоколів від відповідних виробників:

- D8 / D16 (FrSky);
- DSM / DSMX (Spektrum);
- AFHDS 2A (FlySky);
- FASST (Futaba).

## 2.2 Типи двигунів та особливості їх керування

Більшість електродвигунів, які застосовуються в сучасних технологіях, опираються на принцип електромагнітної індукції. Суть полягає в тому, що магнітне поле, створене статором або індуктором, змушує ротор або якір виконувати обертальні рухи. У залежності від типу машини і джерела живлення, цей принцип знаходить різні вираження.

Статор або індуктор є нерухомою частиною електричної машини, а ротор або якір може виконувати обертання навколо своєї осі. У двигунах постійного струму часто використовуються постійні магніти в ролі індукторів, що спрощує конструкцію та зменшує витрати енергії.

У світі радіокерованих моделей, де ефективність і вага грають ключову роль, використовуються два основних типи електродвигунів: щіткові та безщіткові. Щіткові двигуни використовують щітки та комутатор для зміни напрямку струму в роторі, що може призводити до зносу та меншої ефективності.

З іншого боку, безщіткові двигуни, які стають все більш популярними, використовують спеціальні регулятори, які дозволяють змінювати напрямок струму без щіток та комутаторів.

Це робить їх більш ефективними та довговічними в порівнянні зі щітковими аналогами.

### 2.2.1 Колекторний електродвигун

Основною особливістю колекторного електродвигуна є наявність колектора та щіток. Колектор – це обертаюча частина вала двигуна, яка має ряд провідників або ламелей.

Щітки, у свою чергу, знаходяться в нерухомій частині двигуна і забезпечують електричний контакт із колектором.

Принцип роботи полягає в тому, що струм подається через щітки на колектор, що викликає появу електричного струму у котушках, розташованих навколо колектора.

За рахунок взаємодії магнітного поля і струму в котушках виникає обертальний момент, який приводить в рух ротор двигуна.

Колекторні електродвигуни застосовуються у великому спектрі пристроїв, таких як домашні електроприлади, інструменти, вентиляційні системи та інші механізми, де потрібен надійний та доступний за ціною електродвигун.

Комутатор – це набір контактів, розташованих на роторі, а щітки - це ковзні контакти, розташовані на зовнішній стороні ротора і притиснуті до комутатора, як показано на рисунку 2.2.

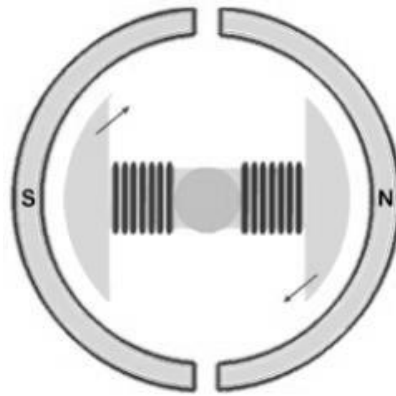


Рисунок 2.2 – Схема колекторного електродвигуна

Двигуни щіток, які використовуються в радіокерованих моделях, працюють від постійного струму.

Наприклад, подавши на два дроти двигуна відповідну напругу від звичайної батарейки або акумулятора, ми приводимо в рух вал двигуна.

Виведемо переваги колекторного типу двигунів:

- мала вага;
- малий розмір;
- низька вартість;
- можливість прямого підключення до джерела струму.

Тому в більшості випадків цей вид двигуна застосовується у моделях з обмеженим бюджетом або в моделях для початківців.ф

Якщо розглядати надійність щіткового двигуна, то вона виявляється значно меншою порівняно з безщітковими моделями. Незважаючи на їхню простоту, щіткові двигуни мають один важливий недолік: обмежений ресурс роботи. Присутність щіткового комутатора передбачає використання механічної системи з рухомими контактами.

Така механічна робота щіток і комутатора може призводити до виникнення іскріння при перегріві та швидкому зносі за невизначених умов експлуатації, таких як вологість, бруд, пил та інші небезпеки [8].

### 2.2.2 Існуючі модулі управління

Класифікація модуля управління, що відповідає за керування підвладними модулями, може бути визначена як абстрактна. У галузі радіолюбителів, цей модуль часто отримує назву "польотний контролер". У подальшому ми будемо використовувати саме цей термін.

Польотний контролер – це електронний пристрій, який здійснює управління літальним апаратом. Цей термін найчастіше використовується для безпілотних літальних апаратів, включаючи авіамоделі. У випадку пілотованих літальних апаратів частіше вживається термін "автопілот". Зазвичай термін "польотний контролер" застосовується до управління мультироторними системами.

До функцій польотних контролерів можна віднести:

- стабілізацію пристрою у повітрі;
- утримання висоти за допомогою барометру або GPS;
- автоматизований політ по заданим точкам;
- передача керувальнику телеметрії;
- забезпечення безпеки польоту.

Зазвичай польотний контролер отримує команди від радіосистеми керування, але також може працювати повністю автономно, виконуючи заздалегідь заданий план польоту або перебуваючи в режимі стеження за об'єктом. Важливо відзначити, що режим автономного польоту застосовується як у простих "селф-коптерах", так і в складних апаратах військового призначення [7].

У таблиці 2.2 представлені повноцінні польотні контролери від визнаних світових виробників. Зазвичай, їх широко використовують для швидкого створення мультироторних систем, оскільки вони вже включають в себе готову та складну програмовану логіку для управління двигунами.

Таблиця 2.2 – Опис радіостандартів

Контролер	Стабілізація	Утримання позиції	Політ по точкам	Телеметрія	Вартість
KarpeinKuk	+	-	-	-	30\$
MultiWii	+	+	+	+	50\$
ArduPilot	+	+	+	+	150\$
PixHawk	+	+	+	+	150\$-500\$
DJI Naza	+	+	+	+	250\$-1000\$
XAircraft	+	+	-	-	400\$-600\$
Zero UAV	+	+	+	+	400\$-2500\$

У таблиці представлені провідні виробники систем керування польотом [6], проте варто відзначити, що деякі з них втратили актуальність через появу конкуруючих китайських моделей і копій.

Зауважимо, що практично всі виробники включають обов'язковий набір функцій, необхідний для успішної реалізації нашого проекту. Це свідчить про стандартизацію та доступність необхідного функціоналу для розробників у цьому сегменті.

Але більшість із них не мають вбудованої периферії, тобто такі системи як GPS, гіроскоп, барометр, радіоприймач та інші необхідно купити окремо, вони не включені у описану вартість. А саме колонка «вартість» підштовхнула мене до розробки власного модулю.

Історично KarpeinKuk, зображений на рисунку 2.3, став одним з піонерів у виробництві польотних контролерів із вбудованою системою стабілізації.

Цей контролер вражає своєю простотою, не маючи в собі зайвих периферійних елементів.



Рисунок 2.3 – Плата контролера KapteinKuk

Цей контролер, зображений на рисунку 2.4, завдяки своїй доступності та відкритому програмному забезпеченню, здобув велику популярність. Код для нього можна скомпілювати у середовищі Arduino IDE.

Останні версії MultiWii включають в себе різноманітні функції, включаючи політ по заздалегідь визначеним точкам. Проект є некомерційним та підтримується зацікавленими ентузіастами, хоча на сьогодні його вважають застарілим [7].

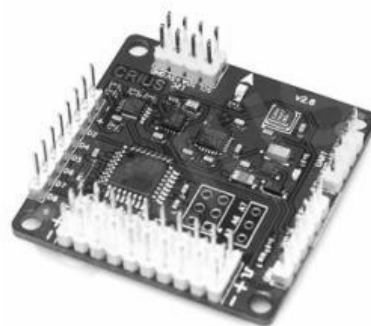


Рисунок 2.4 – Плата контролера MultiWii

ArduPilot з рисунку 2.5 представляє собою один із відкритих контролерів польоту, що базується на платформі Arduino. Схожий на MultiWii, він включає всі необхідні функції для реалізації польоту, такі як автоматизований політ, обробка відеосигналу (OSD), і підтримка

геолокації [8]. Крім того, існують китайські клони, такі як НКPilot, доступні за приблизно 50 доларів. Хоча основна карта АРМ обмежена основними функціями, інші модулі, такі як GPS, OSD, модем, можна придбати окремо.



Рисунок 2.5 – Плата контролера ArduPilot

PixHawk, зображений на рисунку 2.6, представляє собою один з найефективніших контролерів польоту з відкритим кодом, доступних на ринку. Розроблений компанією 3D Robotics, він призначений для заміни застарілого ArduPilot, який використовує 8-розрядну архітектуру процесора.

Незважаючи на те, що вони є повністю сумісними за апаратними можливостями та функціональністю, PixHawk побудований на сучасній 32-розрядній мікроконтролерній платформі STM32, яка базується на ядрах ARM7.



Рисунок 2.6 – Плата контролера PixHawk

Контролери від DJI [3], представлені на рисунку 2.7, отримують високі оцінки від користувачів завдяки відмінній стабільності польоту, що

виявляється значно кращою, ніж у більш економічних аналогів. Незважаючи на обмежену функціональність вбудованих контролерів, їх можливості можуть бути суттєво розширені за допомогою зовнішніх модулів [9].

Наприклад, для бездротового налаштування необхідно придбати модуль Bluetooth за \$50. Щоб вести розширені журнали польотів, можна придбати DJI iOSD MARK II за \$255. Для можливості літати до маршрутних точок, передавати телеметричні дані або керувати з планшета, потрібно придбати наземну станцію Bluetooth iPad 2.4G Datalink за \$300.

Важливо враховувати, що висока функціональність супроводжується значною ціною міткою.



Рисунок 2.7 – Плата контролера DJI Naza

XAircraft, ініціатор розвитку контролерів польоту, виступив піонером у галузі надання простої у використанні програми налаштування з комп'ютера та модуля GPS декілька років тому. Однак, деякі власники виразили претензії до роботи контролера стабілізації, тому на даний момент не рекомендується придбання моделей, таких як XAircraft 450 та XAircraft 650 [9].

Остання версія контролера XAircraft SuperX, яку можна побачити на рисунку 2.8, вийшла недавно і, як стверджується, враховує колишні недоліки. Проте, через обмежену кількість власників цієї системи наразі складно сформулювати статистичну оцінку її ефективності.



Рисунок 2.8 – Плата контролера XAircraft

Як видно, проблеми з надійністю програмного забезпечення стають актуальними навіть для світових брендів. Незважаючи на те, що програмне забезпечення для пілотованих літальних апаратів чи професійних дронів піддається тестуванню на надійність і сертифікації, такі процедури не проводяться для диспетчерів повітряного руху масового виробництва [10]. Це може впливати на загальну безпеку і ефективність використання таких систем у широкому спектрі сценаріїв.

Виробники не можуть заздалегідь проводити вичерпне тестування продуктивності своїх пристроїв, які призначені для управління несертифікованими двигунами. Неможливо гарантувати, що електроніка покупця, яка буде взаємодіяти з регулятором, відповідає всім необхідним вимогам і не має пошкоджень. У зв'язку з цим існує значний ризик нещасних випадків внаслідок програмних помилок.

Усі розглянуті конфігурації мультироторів можуть використовувати коаксіальну схему, що передбачає розміщення двох моторів один над одним на одному валу.

Переваги: більш стійкий при поломці двигуна, має менші габарити при практично однакових тягових характеристиках.

## 3 СКЛАД ЕЛЕМЕНТІВ БПЛА НА ПРИКЛАДІ КВАДРОКОПТЕРА

### 3.1 Компоненти БПЛА

На структурній схемі (рисунок 3.1) відображені основні елементи комплексу безпілотного літального апарату (БПЛА), що в цьому випадку представляє квадрокоптер або мультикоптер з чотирма двигунами, та їх взаємозв'язок.

Окрім системи автоматичного управління, яка є основним компонентом комплексу та забезпечує автономний польот БПЛА, до складу бортової системи літального апарату входять наступні елементи:

- приймач радіосигналу (2.4 ГГц), який приймає сигнал від передавача для ручного управління апаратом;
- контролери двигунів, які приймають вхідний сигнал ШІМ (Pulse-Width Modulation), що надходить від системи управління, та встановлюють заданий режим роботи кожного з двигунів.

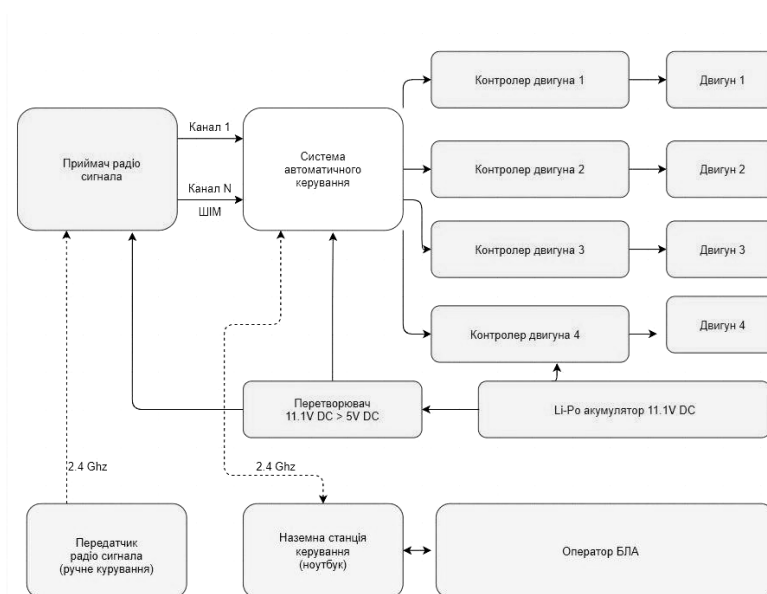


Рисунок 3.1 – Структурна схема комплексу БПЛА

Комплекс БПЛА включає:

- літій-полімерний (LiPo) акумулятор із напругою 11,1 В, який використовується для живлення двигунів та DC-DC перетворювачів. Останні надають енергію системі управління та приймачеві аудіосигналу, вбудованим у контролери двигунів;

- ноутбук у якості наземної станції управління та налагодження.

Основною складовою системи є управлінська система, яка відіграє визначальну роль у функціонуванні всього комплексу. Наступна діаграма (рисунок 3.2) надає докладний опис компонентів цієї системи.

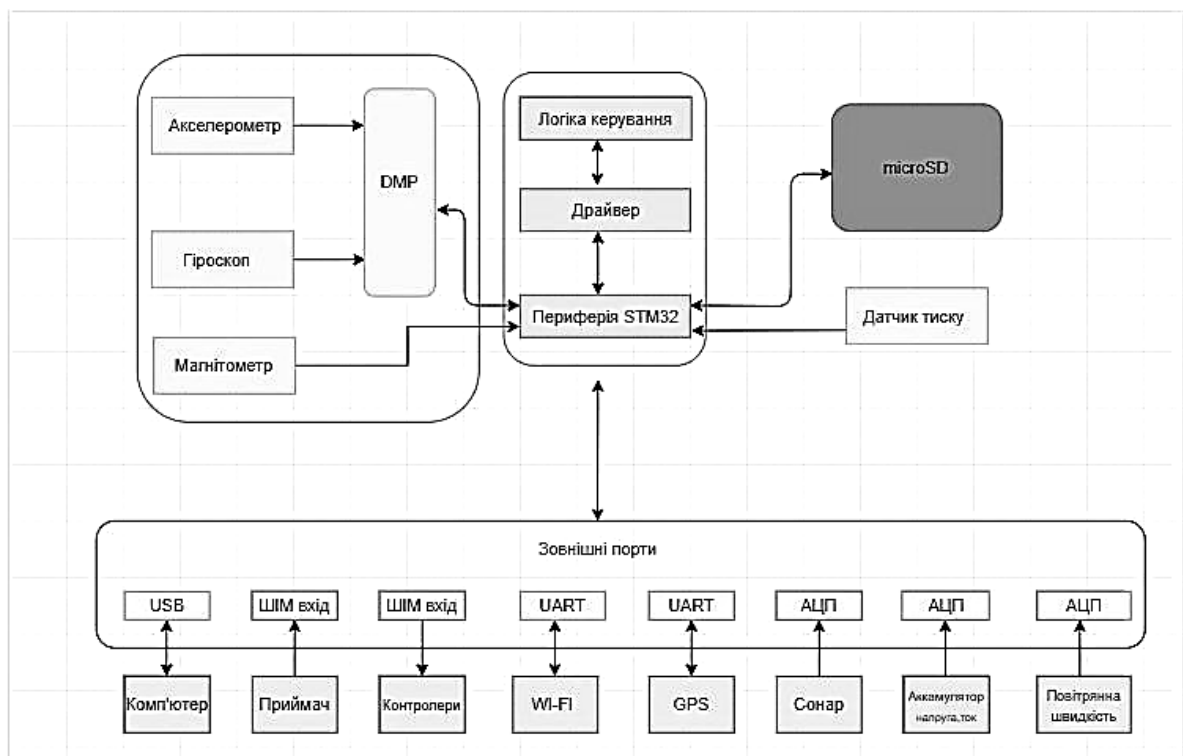


Рисунок 3.2 – Структурна схема компонентів системи керування

З поданої вище схеми видно, що ключовим елементом системи є мікроконтролер. У цьому проекті використовується мікроконтролер STMicroelectronics STM32F103RCT6, який функціонує на ядрі ARM Cortex M3 із тактовою частотою 72 МГц та обладнаний 256 Кб флеш-пам'яті.

Даний мікроконтролер володіє достатньою продуктивністю для успішного виконання визначених завдань.

Програмний код для мікроконтролера може бути розділений на три основні складові:

- периферія STM32 – це набір бібліотек, які дозволяють програмістам простіше та швидше працювати з різними пристроями, що входять в систему керування, наприклад, I2C, SPI, USB, PWM та інші. Ці бібліотеки дають змогу забезпечити зв'язок між мікроконтролером та зовнішніми пристроями, та забезпечують їх правильну роботу;

- драйвер – це програмне забезпечення, яке дозволяє мікроконтролеру обмінюватися даними з іншими пристроями, такими як акселерометри, гіроскопи, магнітометр, барометр, GPS-приймач, модуль бездротового телеметрії, microSD-карта пам'яті та інші. Драйвер містить набір бібліотек, спеціально створених для передачі даних між мікроконтролером та цими пристроями;

- логіка управління польотом – це високорівневі функції, які забезпечують стабілізацію та навігацію літального апарату. Ці функції дозволяють контролювати рухи літака та забезпечувати стабільність польоту. Їх робота базується на даних, що надходять з датчиків, які зчитують інформацію про рух та стан літака, а також на вхідних даних, які вводяться оператором через інтерфейс користувача.

Система управління дроном використовує різноманітні датчики, включаючи MEMS (мікроелектромеханічну систему) – інерційну вимірювальну систему (IMS) з трьома осями акселерометра, гіроскопа і магнітометра, які з'єднані з процесором через інтегральні схеми.

Для обробки кутових швидкостей і прискорень використовується InvenSense MPU6050 із технологією DMP (цифрова обробка руху), що використовує фільтр Калмана. Крім того, в системі є цифровий барометр для вимірювання висоти та магнітометр для визначення курсу.

Для зберігання конфігураційних файлів та записів параметрів польоту використовується слот для карти пам'яті microSD. Сигнали ШІМ використовуються для приймання команд від пульта та керування роботою двигунів. Вхідні сигнали АЦП використовуються для підключення ультразвукового сонара та датчика перепаду тиску для вимірювання висоти та швидкості. Також здійснюється моніторинг напруги та струму акумулятора через входи АЦП [9].

Для забезпечення зв'язку використовуються два UART-порти, які призначені для підключення модулів GPS і бездротової телеметрії, а також USB-інтерфейс, який використовується для налагодження та тестування програмного забезпечення. Електрична схема була розроблена у програмі EagleCAD і втілена на чотиришаровій платі розміром 60x40 мм, де електронні компоненти розташовані з обох сторін (рисунок 3.3).

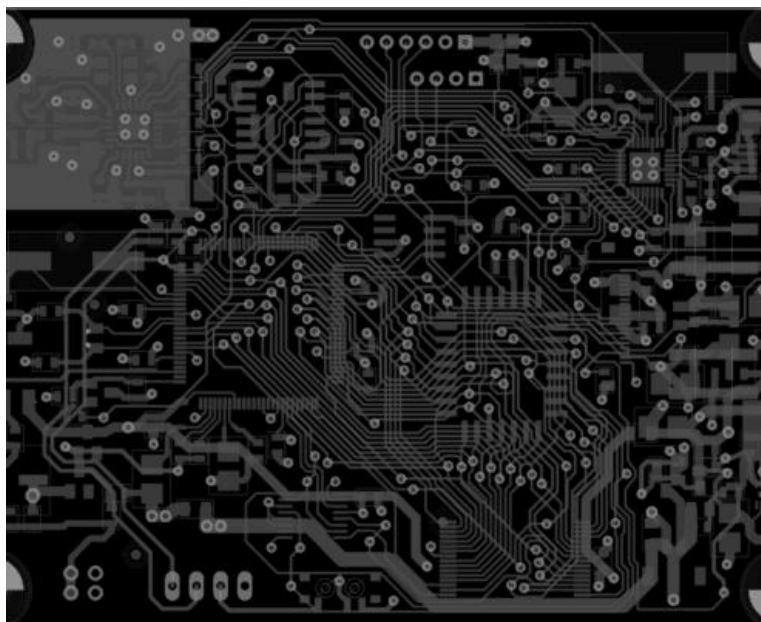


Рисунок 3.3 – Розведення плати по шарам

Перед початком виготовлення друкованих плат була згенерована 3D-модель плати (рисунок 3.4).

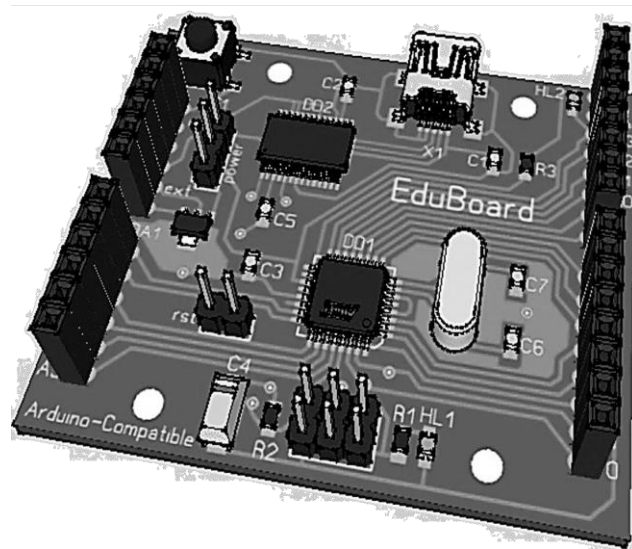


Рисунок 3.4 – 3D-моделі друкованих плат

На рисунку 3.5 наведено фотографію готової зібраної плати.

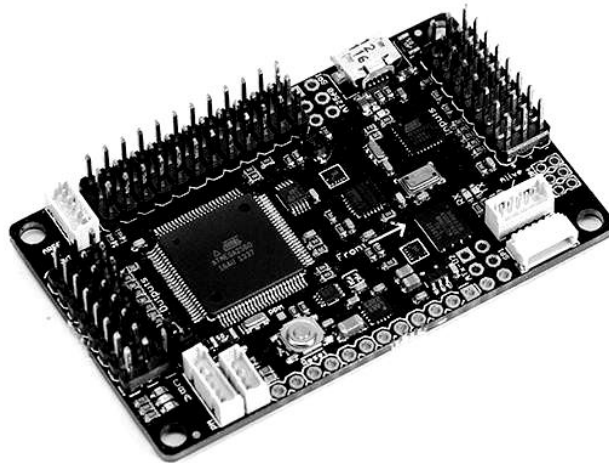


Рисунок 3.5 – Фотографія готової друкованої плати

### 3.2 Принципи обробки інформації з датчиків квадрокоптера

Як згадувалося раніше, програмне забезпечення можна розділити на три групи: периферійні пристрої процесора, драйвери та логіка керування польотом:

- периферійні пристрої процесора були ініціалізовані спочатку, включаючи необхідність написання коду для ініціалізації мікроконтролера та USB інтерфейсу. Останній було налаштовано для роботи в режимі віртуального COM порту, що дозволило здійснювати комунікацію з системою керування за допомогою термінального клієнта. Обмін даними здійснювався через переривання (Interrupt Mode) або прямиий доступ до пам'яті (DMA - Direct Memory Access);

- драйвери, з іншого боку, відіграють важливу роль у процесі отримання фізичних даних з сенсорів та керування актуаторами (контролерами двигунів). Більше уваги було приділено опису розробки драйверів, оскільки це є критично важливим для правильної роботи системи керування.

Однією з ключових складових є інерціальна вимірювальна система (IMS), що формується 3-осьовим цифровим акселерометром MEMS та 3-осьовим гіроскопом MEMS.

Ця система дозволяє точно визначити орієнтацію літака в просторі, що, в свою чергу, сприяє додатковій стабілізації. Компанія InvenSense розробила мікросхему MPU-6050, яка має розміри 4x4x0,9 мм і об'єднує в собі 3-осьовий акселерометр і 3-осьовий гіроскоп з процесором руху в єдиному корпусі.

На рисунку 3.6 представлений цей інтегральний мікросхемний компонент від InvenSense [10].

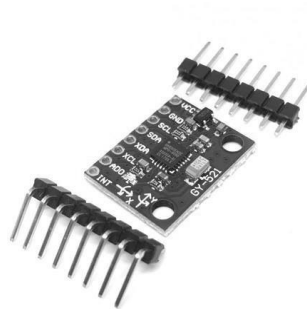


Рисунок 3.6 – Інтегральна схема ІВС

На рисунку 3.7 показано розташування ІБС та її осей на КСП системи керування, а також розташування КСП відносно осей літака.

У системі відлік вимірюються прискорення в напрямку відповідних осей ( $a_x, y, a_z$ ) і кутові швидкості обертання навколо відповідних осей ( $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ ).

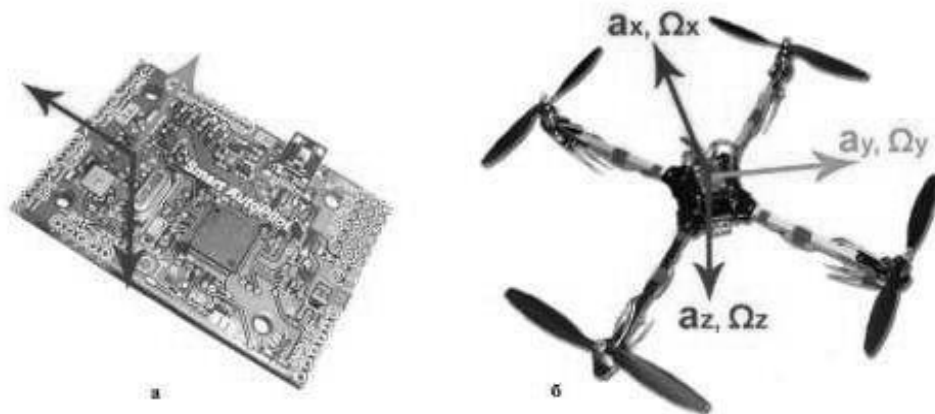


Рисунок. 3.7 – Розташування осі ІБС на друкованій платі системи керування:  
а) розташування осей щодо друкованої плати; б) розташування осей щодо апарату

Для визначення кута повороту навколо її осі застосовується наступна формула, де  $t_1$  та  $t_2$  – час вимірювання на початку та в кінці відповідно:

$$\alpha_i = \int_{t_1}^{t_2} \Omega_i dt$$

Для визначення кута нахилу площини відносно її осі використовується проекція вектора видимого прискорення  $R$  на відповідну вісь, яка позначається як  $R_x, R_y, R_z$  для вісей  $X, Y, Z$  відповідно.

Характерний інтервал часу між початком і завершенням вимірювань становить 5 мс, що відповідає частоті вимірювань 200 Гц.

Це дозволяє акселерометрам коригувати відхилення гіроскопа та визначати початкові опорні кути:

$$\alpha_i = \arccos \frac{R_i}{R}, \text{ де } R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}.$$

Для корекції відхилень від кута повороту, що вимірюється відносно вісі Z гіроскопа, використовується зовнішній магнітометр. Особливо актуально це у тих випадках, коли літак має нульовий крен і тангаж, адже акселерометр не здатний адекватно компенсувати це значення.

Після отримання даних про крен, тангаж і кут крену від акселерометра, гіроскопа і магнітометра, ці величини синтезуються та відфільтровуються для надання інформації про поточні кути. Цей принцип вимірювань та обробки даних використовується внутрішнім процесором мікросхеми, відомим як DMP [13].

Важливо зазначити, що для вимірювання висоти використовуються два різних типи датчиків: цифровий датчик тиску, що базується на технології MEMS, та ультразвуковий ехолот. Це дозволяє забезпечити надійну та точну інформацію про висоту над рівнем моря. Взаємозв'язок між висотою та атмосферним тиском описується відповідною формулою, яка ілюструється на відповідному рисунку.

$$H = 44330 \left( 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right),$$

де  $P$  – тиск на висоті;

$P_0$  – тиск над рівнем моря (101325 Па).

За технічними характеристиками датчика тиску Bosch BMP085, який наразі вважається одним із найточніших, точність вимірювань становить

0,03 гПа, що відповідає похибці 0,25 метра. Проте під час тестувань було виявлено, що датчик схильний до високочастотного шуму, спричиненого коливаннями повітря. У результаті цього розкид вимірювань становить приблизно 2 метри, що є неприйнятним для завдань, які виконує літальний апарат.

Використання середнього фільтра не призвело до задовільних результатів через його затримку. Тому було вирішено використовувати фільтр Калмана, який базується на методі екстраполяції даних з подальшою корекцією відхилень.

На рисунку 3.8 представлені результати вимірювань на постійній висоті, де червона лінія відображає вихід барометра, а синя лінія відображає те саме значення після застосування фільтра Калмана.

З графіка видно, що після застосування фільтрації дифузія по висоті складає не більше 0,8 метра.

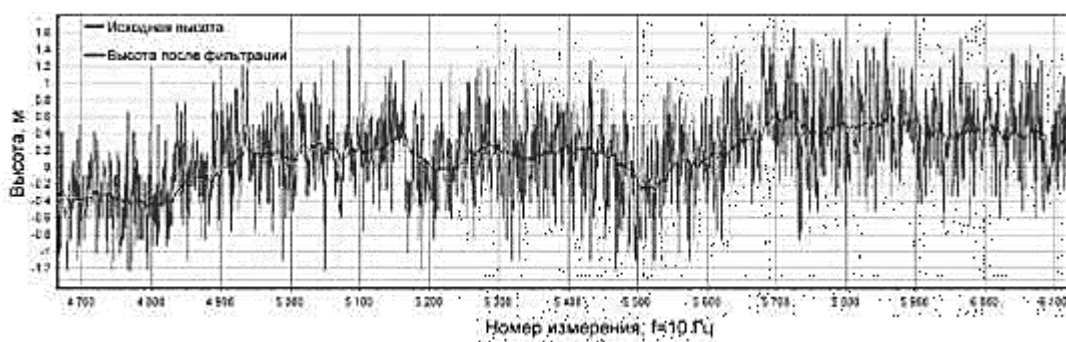


Рисунок 3.8 – Результати вимірювань і фільтрації барометричних даних висоти

Для досягнення високої точності вимірювання висоти до 6 метрів використовується ехолот з роздільною здатністю 1 см – XL-MaxSonar EZ-0, який представлений на рисунку 3.10.

Цей ехолот працює на частоті 42 кГц, має діапазон чутливості, який відображений на рисунку 3.11, і з'єднаний з входом аналого-цифрового

перетворювача мікроконтролера [16], і був обраний для використання в цій системі керування.



Рисунок 3.10 – Ультразвуковий сонар XL – MaxSonar EZ-0

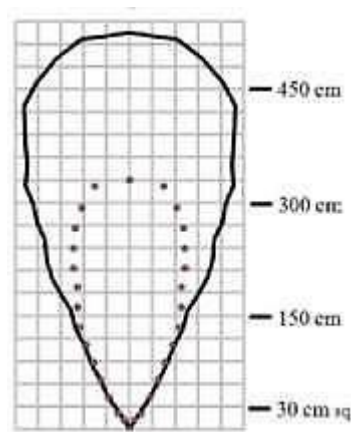


Рисунок 3.11 – Область чутливості сонара

Висота  $H$  (см), виміряна ультразвуковим сонаром, обчислюється за такою формулою:

$$H = \frac{U_B}{0.0049}$$

де  $U_B$  – вихідна напруга( В).

З метою визначення місцезнаходження літального апарату використовується GPS-приймач, який знаходиться в зв'язку із системою управління через UART-порт.

GPS-приймач передає дані з частотою 10 Гц у форматі NMEA (National Marine Electronics Association), що містить інформацію про поточну широту, довготу, висоту, швидкість, курс, час і інші параметри.

Система автоматичного керування обробляє та розшифровує NMEA-рядки, зберігаючи інформацію у відповідних змінних. Під час проведених тестів встановлено, що точність GPS-позиціонування не перевищує 2-3 метри, причому вона залежить від електромагнітного поля в навколишньому середовищі.

Важливо відзначити, що навігація за допомогою GPS можлива лише в умовах відкритого неба, оскільки сигнал GPS є досить слабким. Система управління також має можливість приймати вхідний сигнал від аналогового диференціального датчика тиску для точного вимірювання поточної швидкості польоту.

Відповідно до рівняння Бернуллі:

$$P = P_c + \frac{\rho V^2}{2},$$

де  $P$  – повний тиск;

$P_c$  – статичний тиск;

$\rho$  – щільність повітря;

$V$  – швидкість потоку, що набігає.

Звідси швидкість набігаючого потоку:

$$V = \sqrt{\frac{2(P - P_c)}{\rho}},$$

Для вимірювання різниці тисків використовується датчик, і значення  $P - P_c$  відображає саме це відхилення. Сигнал ШІМ використовується для отримання даних з радіоуправління та контролю обертів двигуна, де тривалість імпульсу 1 мс відповідає мінімальному положенню, а 2 мс – максимальному. Частота оновлення стану сигналу для управління обертами двигуна становить Гц.

У системі управління також передбачений слот для microSD-карти, що дозволяє ефективно записувати та аналізувати дані про польот. Після успішної розробки та тестування програмного забезпечення для зчитування даних з датчиків та їх обробки, наступним кроком є створення алгоритмів та програмування логіки управління польотом.

### 3.3 Алгоритми логіки управління польотом БПЛА

Було відзначено раніше, що управління польотом літака може здійснюватися як вручну, так і автоматично. Також слід враховувати ієрархічну структуру режимів польоту, де кожен наступний режим вищого рівня автономності включає алгоритми попереднього режиму з меншим рівнем автономності [15].

Система управління включає наступні режими польоту, кожен з яких буде детально описаний нижче:

- ручний режим – управління повністю здійснюється оператором;
- режим стабілізації – управління здійснюється оператором, але літак автоматично підтримує нульовий крен, тангаж і стабілізує кут курсу при відсутності дій з боку оператора, забезпечуючи утримання літака в повітрі;

- режим утримання висоти – літак автоматично витримує висоту, яка була на момент включення цього режиму, використовуючи дані сонара і датчика тиску;

- режим утримання позиції за допомогою GPS – літак автоматично витримує позицію, яка була на момент включення даного режиму, використовуючи дані з GPS-приймача;

- режим повернення на точку старту – літак автоматично повертається на точку зльоту, незалежно від його поточного стану, і переходить в режим утримання позиції;

- режим автоматичного польоту по точках – літак автоматично слідує по заданому маршруту;

- режим автоматичного зльоту і посадки – літак автоматично здійснює зльот і посадку;

Під час режиму польоту відбувається конвертація значень відхилень джойстиків крену, тангажу та ристання пульта управління, які зображені на рисунку 3.12. Середнє значення цих обертів відповідає поточному положенню джойстика газу.



Рисунок 3.12 – Передавач радіоуправління

На рисунку 3.13 відображена траєкторія польоту під час повернення літака в початкову точку. Місця включення режиму повернення та напрямок польоту позначені стрілками [10].

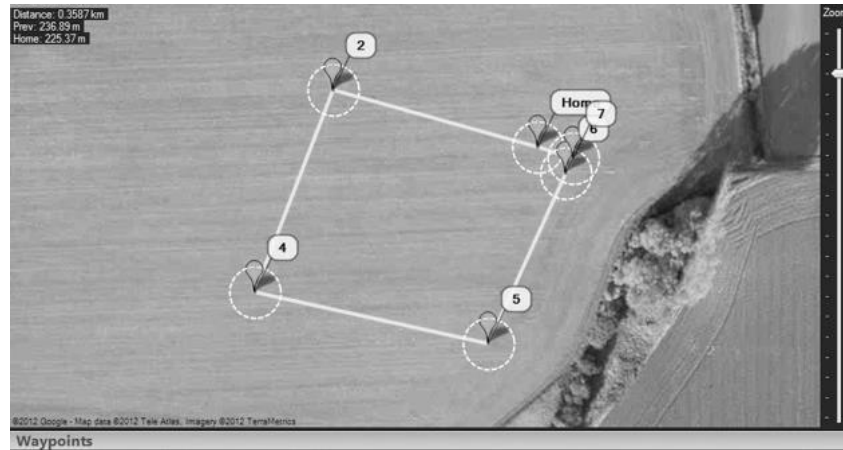


Рисунок 3.13 – Траєкторія автоматичного повернення на точку старту

Автоматичний режим польоту по точках базується на режимі польоту, що був описаний раніше. На рисунку 3.14 представлений трек польоту, який був записаний на вбудовану microSD карту пам'яті та відображений у програмі Google Earth .

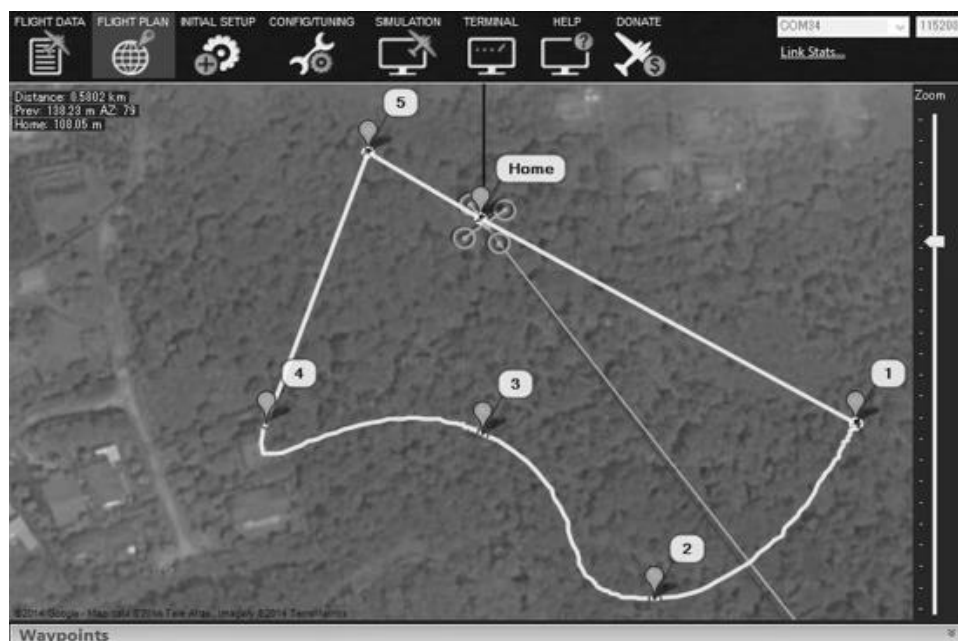


Рисунок 3.14 – Трек польоту, відображений в Google.Earth.

Подано безпілотний літальний апарат типу «квадрокоптер» на ранніх стадіях проектування з використанням програмних пакетів SolidWorks та Simulink/MATLAB.

Спроектвана модель в середовищі Simulink/MATLAB дозволяє проводити оцінку систем стабілізації і систем управління літальним апаратом для БПЛА, виконаного за аеродинамічною схемою «квадрокоптер» без запуску самого квадрокоптера.

## 4 МОДЕЛЬ РУХУ В ПРОСТОРИ КВАДРОКОПТЕРА

4.1 Розробка моделі квадрокоптера в CAD-системі SolidWorks та трансляція моделі у Simscape Multibody

Під час розробки та створення CAD-моделі, використовуючи SolidWorks, можна точно визначити конструктивні параметри, які прямо впливають на динаміку пристрою, такі як маса, момент інерції, розташування центру маси, тензори інерції та інші [12].

Малогабаритний квадрокоптер ZMR250 на рисунку 4.1 представлений як модель, яка розроблена з урахуванням обмежень, вказаних у технічних специфікаціях, та експортована до програмного пакету Simscape/MATLAB Simulation.



Рисунок 4.1 – Візуалізація тривимірної моделі квадрокоптера у CAD-системі Solid Works

Simscape, входячи в склад програмного пакету Simulink/MATLAB, використовує технологію орієнтованого на блоки програмування для блочного моделювання складних динамічних систем.

Simscape Multibody може взаємодіяти з іншими компонентами бібліотеки Simulink/MATLAB, розширюючи можливості моделювання роботизованих систем.

MathWorks створив плагін, щоб уникнути ускладнень під час моделювання динамічної системи в Simulink/MATLAB. Цей плагін, відомий як Simscape Multibody Link, дозволяє експортувати CAD-моделі, створені у системі автоматизованого проектування SolidWorks, та використовувати їх для побудови динамічних моделей в середовищі Simscape Multibody. Це вирішує завдання визначення параметрів, таких як моменти інерції та координати, для кожного елемента системи[13].

На рисунку 4.2 представлена послідовність дій для експорту CAD-моделей, розробленої в CAD системі SolidWorks, Simscape Multibody/MATLAB.

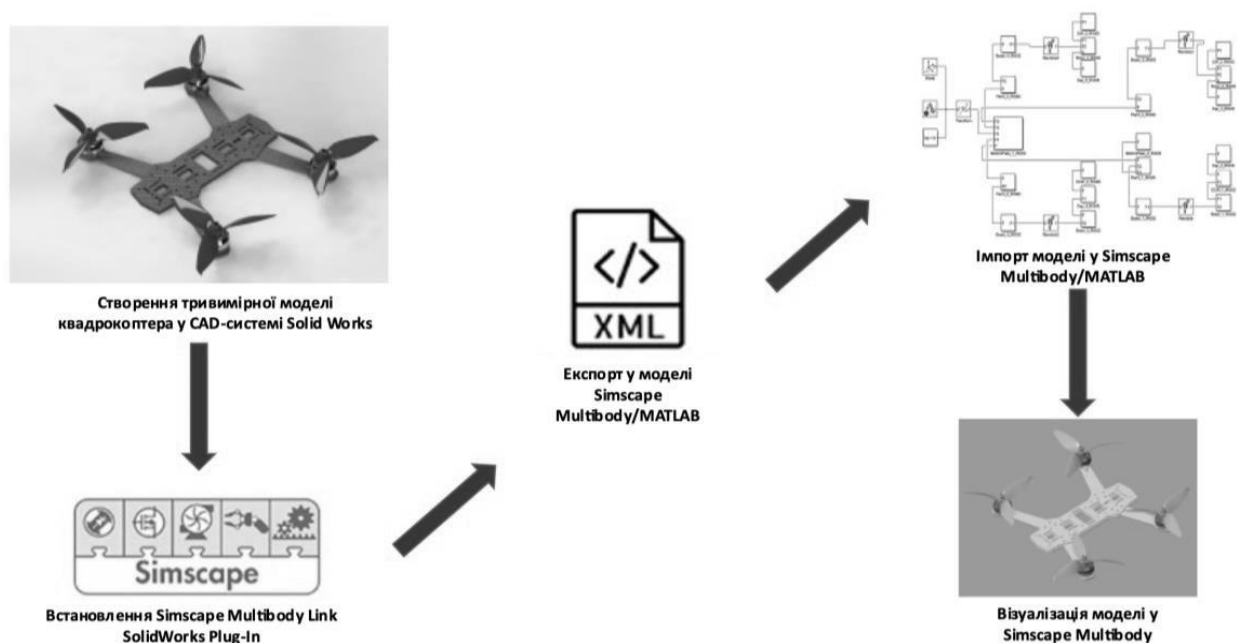
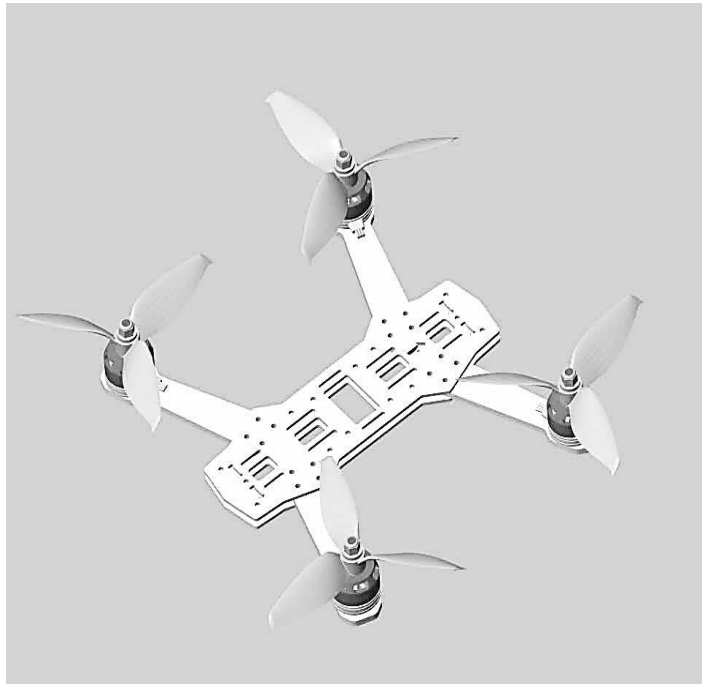


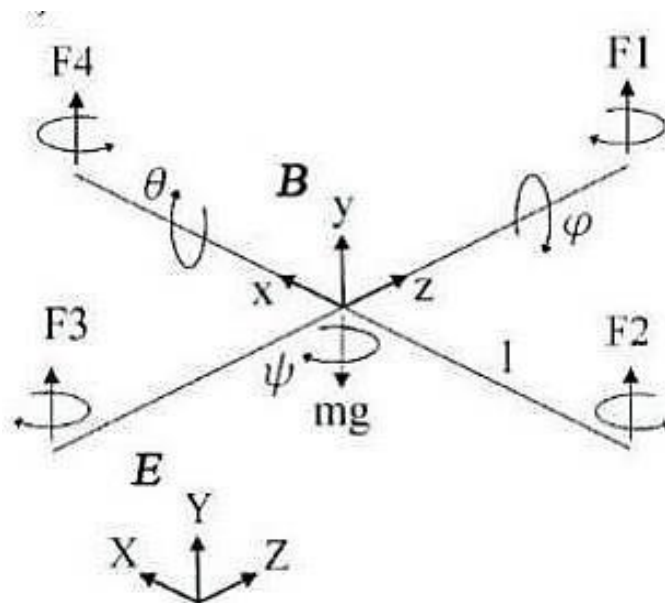
Рисунок 4.2 – Алгоритм роботи плагіна CAD експорту

Експортована модель, розроблена в CAD-системі, у середовищі Simscape Multibody представлено на рисунку 4.3.



Риунок 4.3 – Експортована модель у Simscape Multibody

Квадрокоптер – це літальний пристрій, обладнаний чотирма гвинтами. Зазвичай гвинти кріпляться на двох балках, які перетинаються під прямим кутом і обертаються попарно в протилежних напрямках, як показано на рисунку 4.4.



Риунок 4.4 – Кінематична схема квадрокоптера

Якщо БПЛА спроектований правильно, його центр мас перебуває у його геометричному центрі. Означимо осі земної системи координат (E) через X, Y, Z; а осі пов'язаної системи координат (B) через x, y, z.

Квадрокоптер обладнаний шістьма ступенями свободи у русі. Його переміщення може бути розглянуто як комбінація поступального руху центру мас і обертального руху апарату навколо центра мас.

Жорсткістю конструкції пристрою можна знехтувати, тому рівняння, що описують рух, матимуть наступний вигляд.

Для тіла маси  $m$  справедливий другий закон Ньютона:

$$m\vec{a} = -mg\vec{e}_y + R(\varphi, \theta, \psi)\vec{u}$$

де  $\vec{a} = (x, y, z)^T$  – сумарне прискорення динамічної системи;  $m$  – маса тіла;

$\vec{e}_y$  – одиничний вектор, спрямований уздовж осі Y;  $R(\varphi, \theta, \psi)$  – матриця повороту;

$\vec{u}$  – сума неконсервативних сил, що діють на систему (включаючи сили лобового опору та силу тяги гвинтів).

Система диференціальних рівнянь (2) для кожного з шести ступенів свободи виглядає так:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = U_1(\cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi + \sin\psi \cdot \sin\varphi) \\ m\ddot{y} = U_1(\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \cos\psi \cdot \sin\varphi) \\ mz + mg = U_1(\cos\theta \cdot \cos\varphi) \\ \ddot{\varphi} = \dot{\theta}\dot{\varphi}\left(\frac{I_y+I_z}{I_x}\right) - \frac{I_r}{I_x}\dot{\theta}\omega + \frac{1}{I_x}U_2 \\ \ddot{\theta} = \dot{\varphi}\dot{\psi}\left(\frac{I_z+I_x}{I_y}\right) - \frac{I_r}{I_y}\dot{\theta}\omega + \frac{1}{I_y}U_3 \\ \ddot{\psi} = \dot{\varphi}\dot{\theta}\left(\frac{I_x+I_y}{I_z}\right) - \frac{1}{I_z}U_4 \end{cases}$$

де  $I_x, I_y, I_z$  – моменти інерції тіла щодо осей x, y, z, відповідно,

$I_r$  – момент інерції роторів;

$U_i$  – сили, що діють на динамічну систему.

Рівняння сил, які діють на динамічну систему  $U_1, U_2, U_3, U_4$ , та швидкості пропелерів  $\omega$ , наведені нижче:

$$\begin{cases} U_1 = k(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ U_2 = l(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ U_3 = l(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ U_4 = k(\omega_2^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_3^2) \\ \omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 \end{cases}$$

### 4.3 Реалізація динамічної моделі БПЛА в Simscape Multibody/MATLAB

Працездатність моделі можна перевірити за допомогою розробленого алгоритму управління, що забезпечує стабілізацію кутового положення та утримання заданої висоти при польоті безпілотного літального апарата (БПЛА) типу квадрокоптер.

Модель, яка описує квадрокоптер БПЛА, створеного за допомогою експорту в середовищі Simscape Multibody/MATLAB за допомогою CAD-транслятора, представлена на рисунку 4.5.

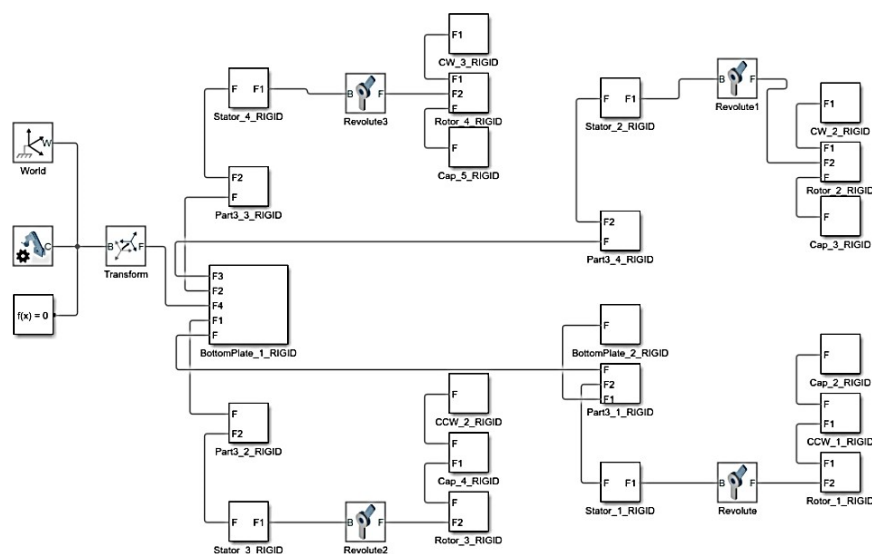


Рисунок 4.5 – Блокова схема комп'ютерної моделі БПЛА типу квадрокоптер

Отримана діаграма відображає структуру розрахункової схеми пристрою, яка була розроблена за допомогою SolidWorks.

Тензори маси та інерції твердих тіл, що утворюють модель безпілотного літального апарата (БПЛА), експортовану до середовища Simscape Multibody/MATLAB, представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Властивості блоків «Body» корпусу квадрокоптера

Елемент	Маса (гр)	Інерція [гр*м <sup>2</sup> ]
Рама	15	$\begin{pmatrix} 0,80 & 0,59 & 0 \\ -0,59 & 0,80 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Двигун	4,5	$\begin{pmatrix} 0,00004436 & 0 & 0 \\ 0 & 0,00001046 & 0 \\ 0 & 0 & 0,00004436 \end{pmatrix}$
Пропелер	0,7	$\begin{pmatrix} -0,00906636 & 0 & 0,99995890 \\ 0,99995890 & 0 & 0,00906636 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$

Крім того, при роботі з імпортованою моделлю динамічної системи часто потрібно враховувати особливості конкретної задачі.

Наприклад, деякі блоки можуть бути вилучені або замінені для точнішого відображення фізичних характеристик моделі.

Додатково проводиться адаптація параметрів, яка дозволяє краще врахувати особливості робочого середовища чи конкретного завдання.

Це забезпечує оптимальну точність та ефективність моделювання для подальших досліджень і аналізу системи. Всі ці корекції покликані забезпечити найкращу адаптацію моделі до поставленого завдання.

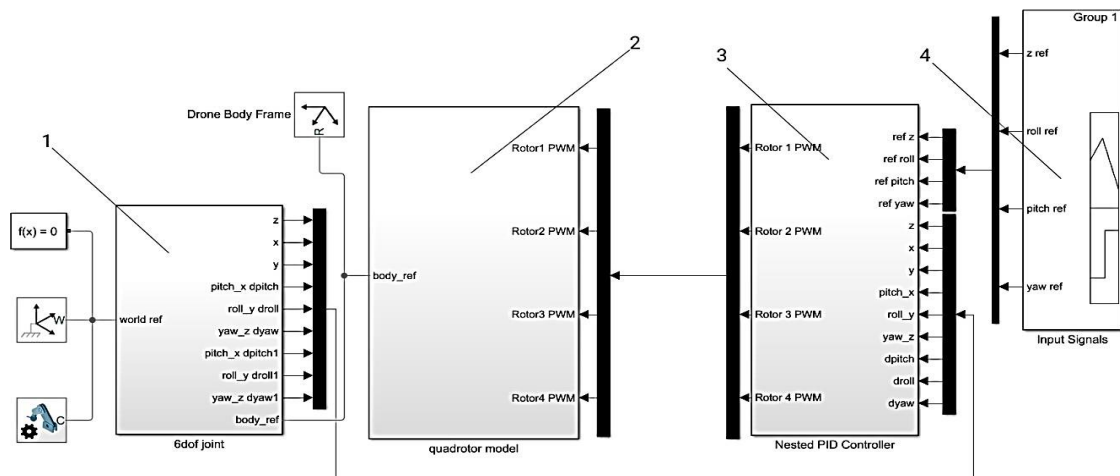


Рисунок 4.6 – Модифікована структурна схема БПЛА типу квадрокоптер

Позначення:

- 1 – підсистема, що описує функціонування квадрокоптера у земній системі координат;
- 2 – підсистема, що описує рухову установку;
- 3 – система керування квадрокоптера;
- 4 – система, що моделює вхідний вплив.

Перша підсистема з (рисунку 4.7) призначена для числення та відображення положення квадрокоптера в земній системі координат залежно від сигналів управління, що надійшли на гвинто-моторну групу апарату.

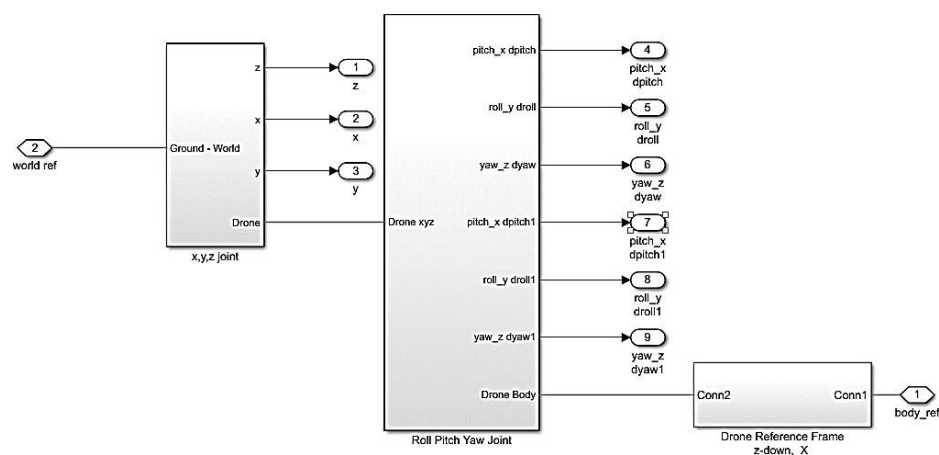


Рисунок 4.7 – Внутрішня структура підсистеми, що описує взаємодію рами квадрокоптера із земною системою координат

У цій підсистемі вихідні значення блоку «X, Y, Z joint» –  $x$ ,  $y$ ,  $z$  являють собою переміщення по осях  $x$ ,  $y$  і  $z$ . Вихідні значення блоку Roll Pitch Yaw Joint:

- $pitch\_xdpitch$  – кут тангажу,  $roll\_ydrroll$  – кут крену;
- $yaw\_zdyaw$  – кут ристання,
- $pitch\_xdpitch1$  – кутова швидкість тангажу,  $roll\_ydrroll1$  – кутова швидкість крену;
- $yaw\_zdyaw1$  – кутова швидкість ристання.

Друга підсистема моделює функціонування гвинтомоторної групи залежно від ШІМ (PWM) – сигналу, що надходить на регулятори оборотів, її структура показана на рисунку 4.8, на якому використані позначення:

- підсистема Body – основна рама, куди кріпляться двигуни квадрокоптера,
- підсистема Rotor – ротори електродвигунів,
- блоки Thrust and Rotation – блоки перетворення ШІМ сигналу тягу та кутову швидкість обертання ротора.

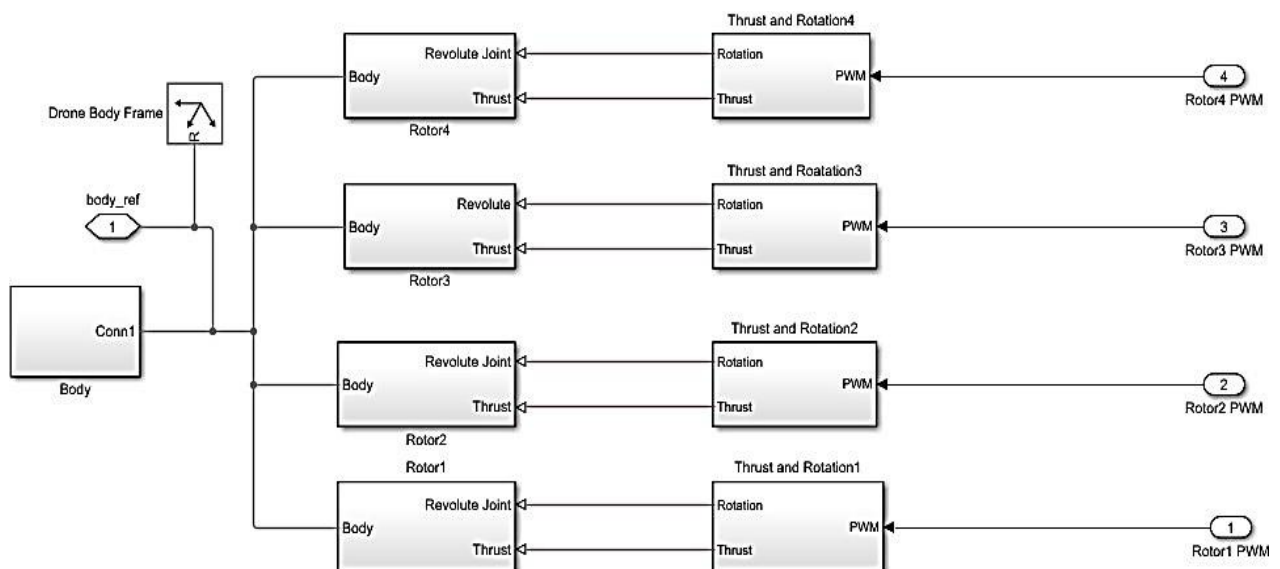


Рисунок 4.8 – Внутрішня структура підсистеми, що описує роботу гвинтомоторної групи

Конструкція "квадрокоптера" характеризується обертанням гвинтів, розташованих на одній осі в різних напрямках. Для емуляції протилежного обертання двигунів необхідно інвертувати сигнал після секції інтегратора.

Схема управління двигуном при використанні модуляції ширини імпульсів (ШІМ) наведена на рисунку 4.9.

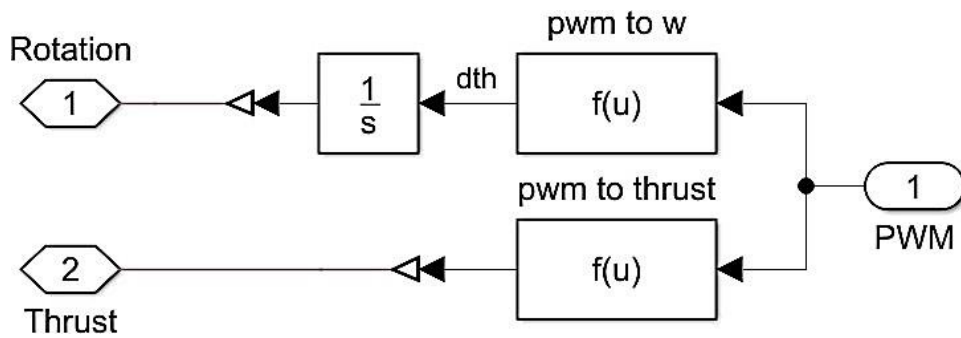


Рисунок 4.9 – Структурна схема перетворення сигналу ШІМ на кількість обертів та тягу двигунів

Третя підсистема визначає систему управління кутовим положенням та висотою польоту апарату (рис. 4.10).

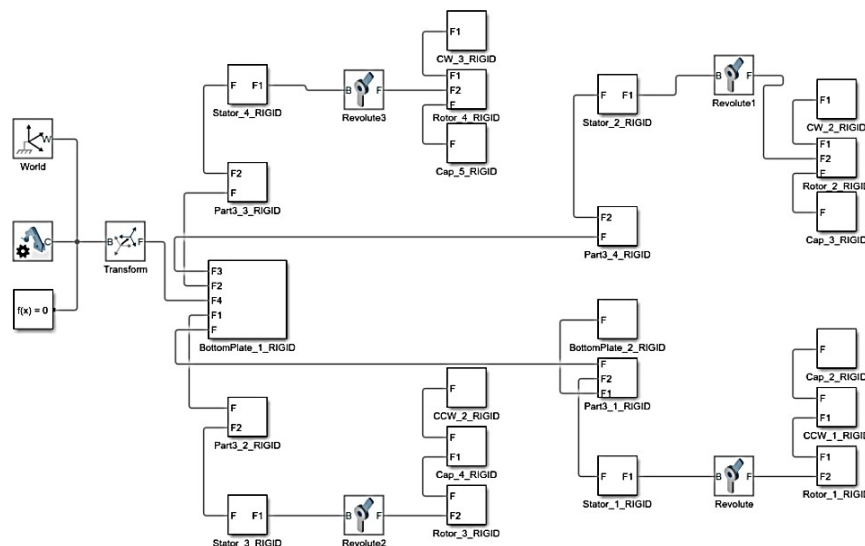


Рисунок 4.10 – Внутрішня структура підсистеми, що описує процес управління

## 4.2 Результати моделювання

Порівняння графіків на рисунках дозволяє виявити відмінності між поведінкою системи управління в комп'ютерній моделі та реальному квадрокоптері. Зауважимо, що результати тестів підтверджують адекватність комп'ютерної моделі, але водночас відкривають можливість для удосконалення системи управління з метою кращого відповідання реальним умовам польоту.

Розглянемо деякі характеристики графіків. Пунктирна лінія на графіках відображає задане значення, тоді як суцільна лінія представляє перехідний процес. Важливо відзначити, що графіки взаємодії системи управління із заданим сигналом, таким як зміна висоти або кута нахилу, різко ілюструють реакцію системи у реальному часі.

Більш того, вказані графіки дозволяють оцінити ефективність використовуваних алгоритмів управління та ідентифікувати можливі аспекти, які можуть бути покращені для оптимальної роботи системи в реальних умовах. Детальний аналіз цих відмінностей дозволить покращити якість управління та підвищити надійність безпілотного літального апарату.

Розробка точних та надійних комп'ютерних моделей для аналізу та управління динамікою польоту є важливим завданням для підвищення безпеки та ефективності БПЛА. Дослідження даних експериментів з реальним квадрокоптером та порівняння їх з результатами комп'ютерної моделі дозволяє виявити можливі відмінності та розробити стратегії для покращення систем управління.

Виокремлення цих відмінностей і подальший аналіз дозволять уникнути потенційних проблем та оптимізувати роботу безпілотних літальних апаратів у конкретних умовах експлуатації. Такий підхід є ключовим для розвитку сучасних систем управління БПЛА та підтримання їхньої актуальності та ефективності в різних сценаріях застосування.

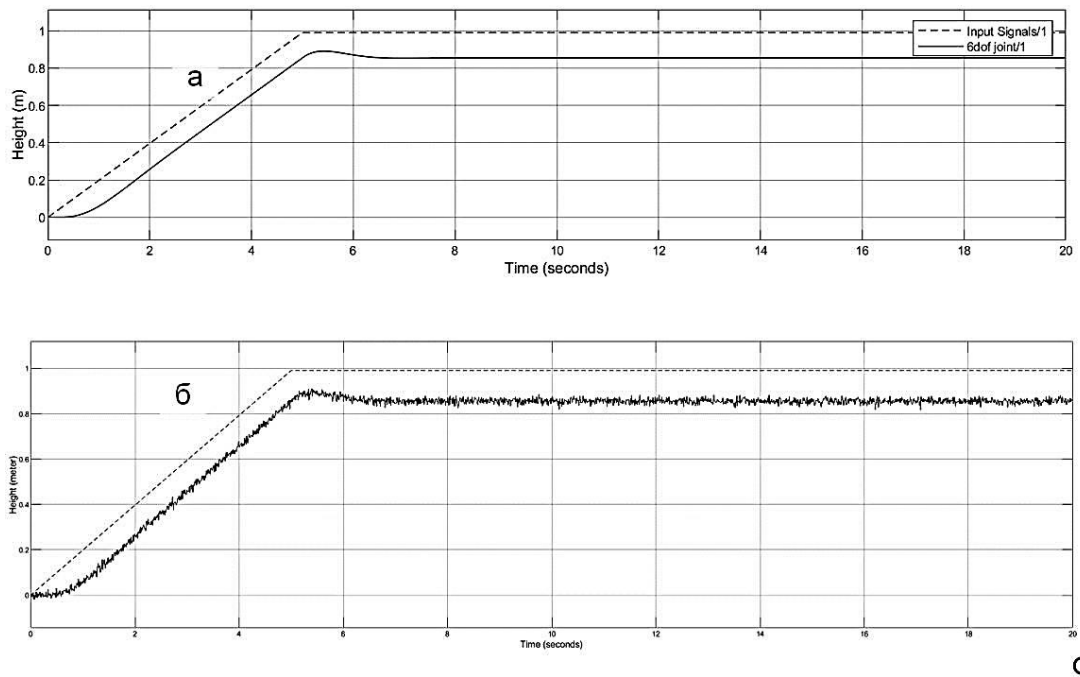


Рисунок 4.11 – Графік перехідного процесу за висотою польоту: а) результати моделювання; б) натурні випробування

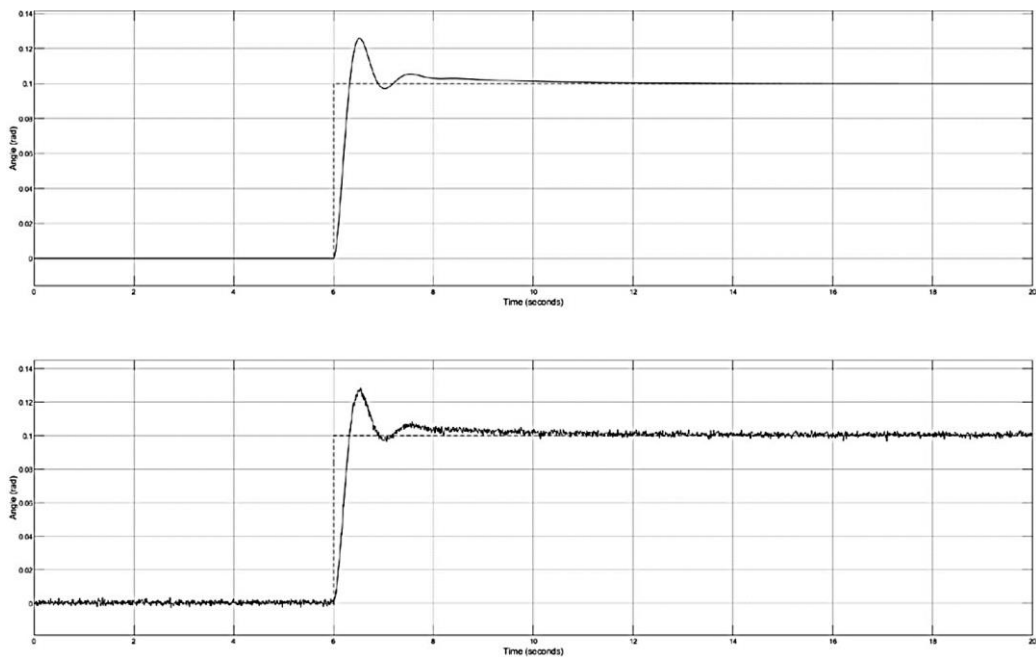


Рисунок 4.12 – Графік перехідного процесу за кутом тангажу –  $\theta$ : а) результати моделювання; б) натурні випробування

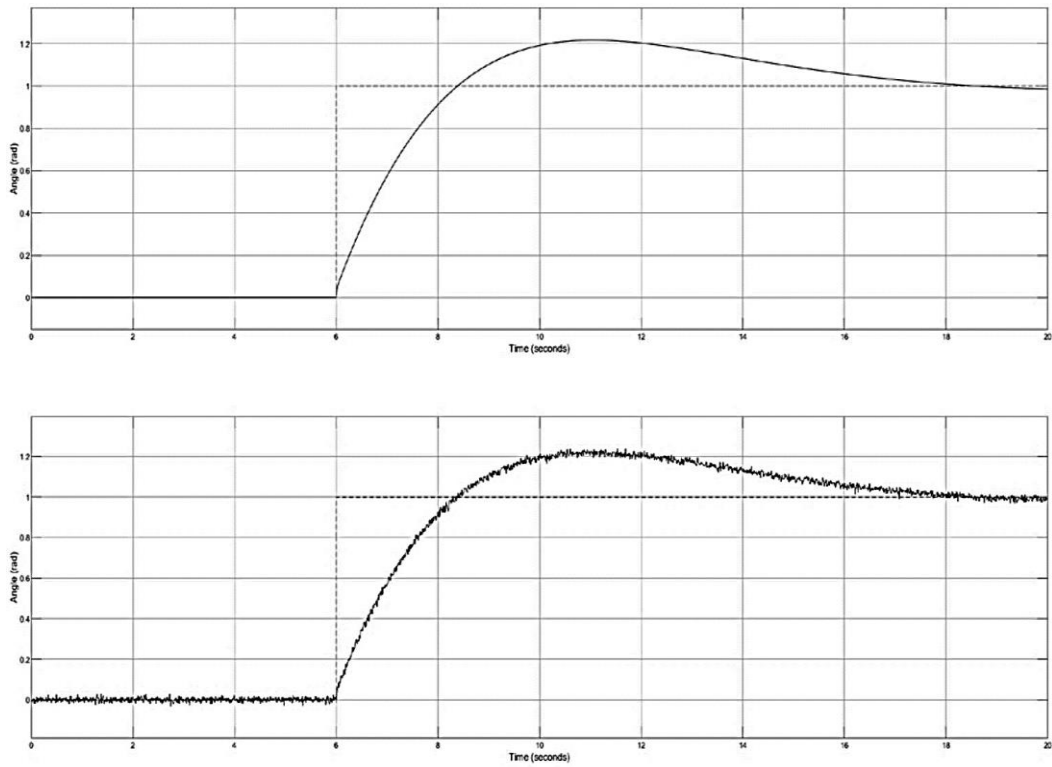


Рисунок 4.13 – Графік перехідного процесу за кутом курсу –  $\psi$ : а) результати моделювання; б) натурні випробування

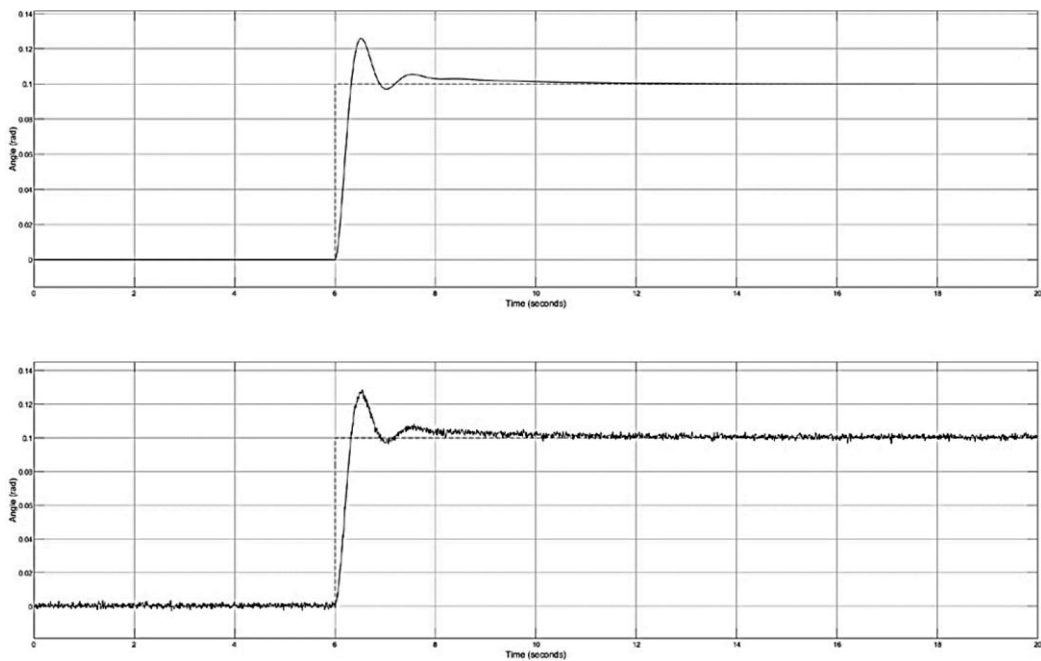


Рисунок 4.14 – Графік перехідного процесу по куту крену –  $\phi$ : а) результати моделювання; б) натурні випробування

У процесі проектування та створення моделі CAD-система SolidWorks дозволяє визначити параметри конструкції, що впливають безпосередньо на динаміку апарату: масу, моменти інерції, положення центру мас, тензор інерції тощо.

На рисунку 3.1 представлена модель малорозмірного квадрокоптера ZMR250, спроектована під задані у технічному завданні обмеження, для якої було виконано експорт у програмний комплекс Simscape/MATLAB Simulation.

За числового моделювання для побудови комп'ютерної моделі використовуються методи обчислювальної математики.

Алгоритмічне (імітаційне) моделювання є одним з видів комп'ютерного моделювання, яке дозволяє відтворювати процес функціонування складної системи на комп'ютері.

Метод моделювання, який використовує аналітичні залежності та моделі для імітації елементарних явищ у процесі, що включає відтворення їхньої логічної та семантичної структури, разом із послідовністю плину в часі, представляє імітаційне моделювання. Цей підхід дозволяє отримати новий контекст інформації про стан системи в заданий момент часу.

Такий вид моделювання може бути як детермінованим, так і стохастичним. Спрямоване на отримання статистичних даних щодо процесів у системі, яку моделюють, статистичне моделювання забезпечує аналіз статистичних характеристик.

З розвитком математичних досліджень з'являються нові типи моделей та ознаки для їх класифікації, що ускладнює проблему систематизації. Це призводить до процесу інтеграції моделей різних типів у більш складні конструкції.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було розглянуто основні концепції багатороторних систем, визначено переваги та недоліки двовісних, тривісних та чотирьохосьових конфігурацій. Після уважного зважування всіх "за" та "проти" було прийнято рішення на користь чотирьохосьового розташування системи, що є оптимальним вибором. Ця конфігурація квадрокоптера надає оптимальний рівень стабілізації, не вимагаючи зайвого споживання електроенергії на забезпечення непотрібної кількості двигунів.

Сигнал на частоті 2,4 ГГц може забезпечити надійну потужність на значних відстанях, проте звичайні протоколи зважають на обмеження дальності до 100 метрів, що недостатньо для вимог нашого проекту. В ході дослідження були проаналізовані характеристики радіоапаратури дистанційного керування від світових виробників для визначення оптимального рішення.

На сьогоднішній день більшість виробників пропонують власні протоколи передачі даних, що базуються на сигналі 2,4 ГГц. Вони також забезпечують високу стійкість до перешкод і завад. Однак, на жаль, детальніших відомостей про це нам на даний момент немає. Ми провели оцінку переваг та недоліків двох типів електродвигунів, які зазвичай використовуються у багатороторних системах. Зазначимо, що багатороторні системи, через свої конструктивні особливості, є схильними до дестабілізації.

Під час розробки такої системи виявляється, що вона часто виходить з ладу. Незважаючи на те, що щіткові двигуни менші та дешевші, я вирішив використовувати безщіточні двигуни з метою забезпечення їхньої більшої надійності. У заключному розділі ми розглянули сучасний ринок диспетчерів повітряного руху, які, в основному, відповідають вимогам цього проекту.

Розглянуті різні методи аналізу динаміки польоту квадрокоптера. На ранніх етапах проектування безпілотного літального апарату типу

квадрокоптер використовує програмні пакети SolidWorks та Simulink/MATLAB.

Модель, розроблена в середовищі Simulink/MATLAB, дозволяє оцінювати системи стабілізації та управління літальним апаратом типу квадрокоптер за аеродинамічною схемою "квадрокоптер" без фактичного запуску апарата.

Описано підхід до комп'ютерного моделювання безпілотного літального апарату типу квадрокоптера за використання інтеграції програмних пакетів SolidWorks та SimMechanics/MATLAB.

Створено динамічну модель квадрокоптера-БПЛА, що базується на методі орієнтованого програмування в середовищі SimMechanics та алгоритмі керування. Ця модель забезпечує необхідну стабілізацію та можливість підтримувати висоту під впливом горизонтальних потоків повітря.

Дослідження та аналіз моделей вказали на переваги середовища SimMechanics у порівнянні з традиційним підходом до моделювання. Виявлено, що воно пропонує просте конструювання та параметризацію, швидке усунення несправностей, а також гнучкі засоби вимірювання та візуалізації

Різниця між комп'ютерною моделлю та результатами польових випробувань становить лише кілька відсотків для кутів тангажу, крену та інших параметрів. Зазначено високу точність узгодження шаблонів, що свідчить про придатність представленого підходу.

Дослідження підтверджують придатність цих методів для вивчення динаміки польоту БПЛА (квадрокоптера) з можливістю подальшого вдосконалення.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ang K.H., G. Chong, Y. Li. PID control system analysis, design, and technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. 576 p.
2. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems Journal of Basic Engineering. 1960. 45 p.
3. Stellman, A. Applied Software Project Management. O'Reilly Media. 2008. 336 p.
4. Petter L. Quantification and Traceability of Requirements. O'Reilly Media. 2005. 115 p.
5. Сайт компанії dji [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dji.com/mavic>
6. Сайт технології Wi-Fi [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wi-fi.org/>
7. Сайт технології Bluetooth [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.bluetooth.com>
8. Сайт, де зазначено GPS модуль Ublox M8N [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod1152-gps-modul-ublox-neo-m8n-skompasom>
9. Сайт, де зазначено польотний контролер Matek F405-CTR [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://flymod.net/item/matek\\_f405\\_ctr](https://flymod.net/item/matek_f405_ctr)
10. Сайт, де зазначено регулятор обертів Spedix [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://flymod.net/item/es30\\_hv\\_speed\\_controller\\_spedix](https://flymod.net/item/es30_hv_speed_controller_spedix)
11. Сайт, де зазначено безколекторні двигуни RacerStar [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://flymod.net/item/racerstar\\_br2205s\\_pro](https://flymod.net/item/racerstar_br2205s_pro)
12. О.І.Тимочко, Д.Ю. Голубничий, В. Ф. Третяк, І. В. Рубан. Класифікація безпілотних літальних апаратів. Системи озброєння і військова техніка. Харків. 2007. 66 с.

13. Жеребко О. І., Гриценко О. В. Моделювання і керування квадрокоптерами. – Київ: Вид-во КПУ. 2019, 75 с.

14. Громов, А.А. Керування багатоконтерними системами на основі комп'ютерного моделювання: навчальний посібник. - Київ: Видавництво "Логос", 2021. 216 с.

15. Гривюк О. Технології 3D сканування. Інформаційно-комп'ютерні технології. 2018. 245 р.

16. Піскаръов О.М., Внуков О.О., Проектування та дослідження системи програмного керування роботом на базі STM32. І міжнародна наукова конференція «Інноваційна наука: пошук відповідей на виклики сучасності». 22.12.2023; Одеса, Україна. 2023 р С. 264-268. ISBN: 978-617-8126-93-3 DOI: <https://doi.org/10.36074/mcnd-22.12.2023>

17. Піскаръов О.М., Внуков О.О., Проектування та дослідження системи програмного керування роботом на базі STM32. Проблеми інформатизації : одинадцята міжнародна науково-технічна конференція. 17.11.2023. Том 3: секція 4. Харків. Україна.