

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ФАКУЛЬТЕТ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ ТА ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ

Кафедра системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) **Віталій РОМАНКЕВИЧ**
(ініціали, прізвище)

«» травня 2026 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Системне програмування та спеціалізовані комп'ютерні системи»
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»**

по спеціальності

123 «Комп'ютерна інженерія»

на тему: Модуль керування гіростабілізованою платформою камери FPV дрона.

Виконав: студент IV курсу, групи КВ-21
(шифр групи)

Голобородько Софія Олександрівна
(прізвище, ім'я, по батькові) _____
(підпис)

Керівник: старший викладач каф. СПСКС,
к.т.н Коляда Костянтин Вячеславович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____
(підпис)

Консультант з нормоконтролю:

доцент каф. СПСКС, к.т.н., доцент Клятченко Ярослав Михайлович
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) _____
(підпис)

Рецензент:

доцент каф. ОТ, к.т.н., доцент Марковський Олександр Петрович.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____
(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студентка _____
(підпис)

Київ – 2026 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ФАКУЛЬТЕТ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ ТА ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ

Кафедра системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Освітньо-професійна програма
«Системне програмування та спеціалізовані
комп'ютерні системи»
Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) Віталій РОМАНКЕВИЧ
(ініціали, прізвище)
«__» _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студента**

Голобородько Софія Олександрівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту Модуль керування гіростабілізованою платформою камери FPV дрона.

керівник проєкту _____
Коляда Костянтин Вячеславович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «28» __ травня __ 2026 р. № 1984-с

2. Термін подання студентом проєкту 8 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту Див. ТЗ _____

4. Зміст пояснювальної записки: аналіз існуючих рішень та обґрунтування ДП, принцип роботи і технології модулю керування, розробка модулю керування, розробка можливості вдосконалення системи на базі STM32 _____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Схема електрична принципова, Схема з'єднань, Схема алгоритму, Схема алгоритму, презентація до захисту ДП, Фрагменти коду.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Клятченко Я.М., к.т.н., доцент каф. СП і СКС		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Видача завдання на дипломне проєктування	18.10.2025	
2.	Вивчення літератури за тематикою проєкту	09.11.2025	
3.	Розроблення та узгодження технічного завдання	18.11.2025	
4.	Аналіз існуючих рішень	12.12.2025	
5.	Підготовка матеріалів першого розділу дипломного проєкту	28.02.2026	
6.	Підготовка матеріалів другого та третього розділів дипломного проєкту	15.04.2026	
7.	Підготовка графічної частини дипломного проєкту	19.05.2026	
8.	Оформлення документації дипломного проєкту	28.05.2026	
9.	Попередній огляд матеріалів проєкту на кафедрі	04.06.2026	

Студент

(підпис)

Софія ГОЛОБОРОДЬКО

(І'мя та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту

(підпис)

Костянтин КОЛЯДА

(І'мя та ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврський дипломний проєкт включає пояснювальну записки (стор.51, рис. 6 , список використаної літератури з 15 найменувань, додатків, презентація 20 слайдів).

Даний дипломний проєкт присвячений розробці модуля керування гіростабілізованою платформою FPV дрона

Мета розробки – дослідити та розробити систему керування гіростабілізованою платформою, яка забезпечує стабілізацію положення камери під час руху безпілотного літального апарата.

У даній роботі досліджуються принципи побудови гіростабілізованих платформ для FPV-дронів, методи визначення просторової орієнтації за допомогою MEMS-датчиків. Об'єктом дослідження є процес стабілізації положення камери FPV дрона під час польоту. Предметом дослідження є апаратні та програмні засоби реалізації системи керування гіростабілізованою платформою.

Для досягнення поставленої мети було проведено:

- Аналіз існуючих систем стабілізації камер та гіростабілізованих платформ, що застосовуються в сучасних FPV-дронах.
- Дослідження принципів роботи MEMS-гіроскопів та інерціальних датчиків орієнтації, а також методів визначення кутового положення об'єкта у просторі.
- Розробка апаратної частини системи керування на базі мікроконтролера STM32, датчика орієнтації BNO055 та сервоприводів.
- Розробка програмного забезпечення для зчитування даних з датчика, обчислення орієнтації платформи за допомогою кватерніонів та формування сигналів керування сервоприводами.

У результаті виконання дипломного проєкту було розроблено модуль керування гіростабілізованою платформою, який забезпечує компенсацію кутових відхилень та підтримання стабільного положення камери під час польоту.

Ключові слова: модуль, гіростабілізована платформа, MEMS-гіроскоп, FPV дрон, стабілізація, кватерніон.

ABSTRACT

The bachelor's thesis project includes an explanatory note (p. 51, Fig. 6, a list of used literature of 15 titles, appendices, a presentation of 20 slides).

This bachelor's project is devoted to the development of a control module for a gyro-stabilized platform of an FPV drone.

The purpose of the project is to study and develop a control system for a gyro-stabilized platform that ensures camera stabilization during the movement of an unmanned aerial vehicle.

This paper investigates the principles of designing gyro-stabilized platforms for FPV drones and methods of determining spatial orientation using MEMS sensors. The object of the research is the process of stabilizing the position of an FPV drone camera during flight. The subject of the research is the hardware and software means for implementing a gyro-stabilized platform control system.

To achieve this goal, the following tasks were carried out:

- Analysis of existing camera stabilization systems and gyro-stabilized platforms used in modern FPV drones.

- Study of the operating principles of MEMS gyroscopes and inertial orientation sensors, as well as methods for determining the angular position of an object in space.

- Development of the hardware part of the control system based on an STM32 microcontroller, a BNO055 orientation sensor, and servo drives.

- Development of software for reading sensor data, calculating platform orientation using quaternions, and generating control signals for servo drives.

As a result of the diploma project, a control module for a gyro-stabilized platform was developed, providing compensation of angular deviations and maintaining a stable camera position during flight.

Keywords: module, gyro-stabilized platform, MEMS gyroscope, FPV drone, stabilization, quaternion.

[illegible]

[illegible]

ЗМІСТ

1. НАЙМЕНУВАННЯ ТА ГАЛУЗЬ РОЗРОБКИ.	2
2. ПІДСТАВА ДЛЯ РОЗРОБКИ.	2
3. ЦІЛЬ І ПРИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ.	2
4. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ.	2
5. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ.	2
5.1. Вимоги до апаратного забезпечення.	3
5.2. Вимоги до апаратного забезпечення користувача	3
6. ЕТАПИ РОЗРОБКИ.	3

					ІАЛЦ. 468300.002 ТЗ				
Зм	Акр.	№ докум.	Підп.	Дата					
Розроб.		Голобородько С. О.			Модуль керування гіростабілізованою платформою камери FPV дрона. <i>Технічне завдання</i>				
Перев.		Коляда К.В.							
Н. контр.		Клятченко Я.М.							
Затв.		Романкевич В.О.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів		
						1	3		
					«КПІ ім. Ігоря Сікорського»,ФПСІМ,КВ-21				

1. НАЙМЕНУВАННЯ ТА ГАЛУЗЬ РОЗРОБКИ

Назва розробки: «Модуль керування гіростабілізованою платформою камери FPV дрона».

Галузь застосування: створення гіростабілізованої платформи камери, модулю керування по RS-485.

2. ПІДСТАВА ДЛЯ РОЗРОБКИ

Підставою для розробки є завдання на виконання роботи першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, затверджене кафедрою системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

3. ПРИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ

Метою даного проекту є створення модулю керування гіростабілізованою платформою камерою FPV дрона по RS-485.

4. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

Джерелом інформації є технічна та науково-технічна література, технічна документація, публікації в періодичних виданнях та електронні статті у мережі Інтернет.

5. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

5.1 Вимоги до апаратного забезпечення

- Створення модуля керування платформою;
- Стабілізація платформи;

					ІАЛЦ. 468300.002 ТЗ	Арк.
						2
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.2 Вимоги до апаратного забезпечення користувача

- Наявність блоку живлення 5 В.

6. ЕТАПИ РОЗРОБКИ

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів
1.	Видача завдання на дипломне проектування	18.10.2025
2.	Вивчення літератури за тематикою роботи	16.11.2025
3.	Розроблення та узгодження технічного завдання	25.11.2025
4.	Розроблення структури системи	17.01.2026
5.	Розроблення структури та функціонал елементів	04.02.2026
6.	Практична реалізація системи	15.03.2026
7.	Тестування системи	04.04.2026
8.	Підготовка матеріалів текстової частини проекту	24.04.2026
9.	Підготовка матеріалів графічної частини проекту	17.05.2026
10.	Оформлення технічної документації проекту	28.05.2026

[illegible]

[illegible]

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ, СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	3
ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ТЕМИ	
1.1 Особливості стабілізації камер у FPV-дронах	5
1.2 Аналіз методів стабілізації	5
1.3 Огляд MEMS-гіроскопів та принцип роботи	7
1.4 Обґрунтування вибору підходу до стабілізації	9
2 ПРИНЦИП РОБОТИ ГІРОСТАБІЛІЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ	
2.1 Отримання даних орієнтації з MEMS датчика BNO055	15
2.2 Визначення кутів орієнтації платформи	16
2.3 Похибки вимірювання та дрейф гіроскопа	18
2.4 Методи компенсації похибок	20
2.5 Принципи компенсації руху платформи	22
2.6 Переваги використання STM32	24
2.7 Переваги обраного мікроконтролера	25
2.8 Аналіз характеристик сервоприводів	28
2.9 Основи математичного апарату кватерніонів	29
2.10 Переваги кватерніонів над кутами Ейлера	31
3 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ГІРОСТАБІЛІЗОВАНОЮ ПЛАТФОРМОЮ	
3.1 Архітектура модуля керування	34
3.2 Алгоритм зчитування даних з гіроскопа	36
3.3 Обчислення кутів орієнтації	37

					ІАЛЦ.468300.004 ПЗ				
Зм	Акр.	№ докум.	Підп.	Дата					
Розроб.		Голобородько С. О.			Модуль керування гіростабілізованою платформою камери FPV дрона <i>Пояснювальна записка</i>				
Перев.		Коляда К.В.							
Н. контр.		Клятенко Я.М.							
Затв.		Романкевич В.О.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів		
						1	50		
					«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФПСІМ, КВ-21				

3.4 Використання кватерніонів для опису орієнтації	39
3.5 Обчислення орієнтації на основі кватерніонів	41
3.6 Перетворення кватерніонів у кути для керування сервоприводами	42
3.7 Генерація PWM сигналів для сервоприводів	44
3.8 Тестування та аналіз роботи системи	45
ВИСНОВКИ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	50

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Графічний матеріал

- ІАЛЦ.468300.005 Е4. Блок орієнтації. Схема електрична принципова
- ІАЛЦ.468300.006 Е3. Блок орієнтації. Розміщення компонентів.
- ІАЛЦ.468300.007 Д1 Алгоритм роботи програми. Схема алгоритму
- ІАЛЦ.468300.008 Д2 Зчитування кватерніонів. Схема алгоритму

ДОДАТОК Б. Фрагменти програмного коду

ДОДАТОК В. Презентація

Відео роботи модуля

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ, СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА (безпілотний літальний апарат) – авіаційний засіб, здатний виконувати політ без перебування пілота на борту та керований дистанційно або за допомогою автономних алгоритмів.

Гіростабілізована платформа – система з приводами та датчиками орієнтації, призначена для підтримання стабільного положення камери незалежно від рухів носія.

Кватерніон – математичний об'єкт, що використовується для опису просторової орієнтації та обертання без виникнення проблеми складання рамок.

Сервопривід – виконавчий механізм з вбудованою системою керування положенням, що використовується для стабілізації платформи камери.

FPV (First Person View) – технологія керування безпілотним літальним апаратом, що забезпечує передачу відеосигналу з бортової камери оператору в режимі реального часу, створюючи ефект присутності та огляду від першої особи.

PWM (Pulse Width Modulation), ШІМ (широотно-імпульсна модуляція) – метод керування потужністю або положенням виконавчих механізмів шляхом зміни тривалості імпульсів при постійній частоті.

Sensor Fusion – алгоритм злиття даних від декількох датчиків для підвищення точності визначення орієнтації та положення об'єкта у просторі.

PID-регулятор (Proportional-Integral-Derivative Controller) – регулятор, який формує керуючий вплив на основі пропорційної, інтегральної та диференціальної складових похибки.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		3

ВСТУП

Стрімкий розвиток та впровадження безпілотних літальних апаратів у різні галузі промисловості, від моніторингу територій до виконання спеціальних завдань в оборонному секторі, зумовлені їхньою здатністю оптимізувати витрати часу й ресурсів та забезпечувати доступ до важкодоступних об'єктів. Проте ефективне використання дронів обмежене низкою критичних проблем, серед яких ключовими є низька стабільність відеопотоку в умовах різких маневрів, висока чутливість до вібрацій силової установки та складність інтуїтивного керування камерою. Актуальність теми дипломного проєкту полягає у необхідності створення високоефективного мікропроцесорного модуля керування гіростабілізованою платформою камери, який здатний автономно компенсувати кутові коливання носія на базі сучасних мікроелектромеханічних систем та забезпечувати синхронізацію зв'язку з оператором.

У дипломному проєктуванні виконана програмно-апаратна реалізація та аналіз роботи модуля керування двохосьовим підвісом камери FPV-дрона, що забезпечує динамічну стабілізацію платформи та підтримку інтерфейсу RS-485 для точного наведення камери за командами оператора. Для досягнення цієї мети.

У роботі виконано розробку програмного забезпечення для мікроконтролера STM32, що забезпечує зчитування даних з інерціального датчика, обчислення просторової орієнтації платформи, розрахунок компенсаційних кутів та формування сигналів керування сервоприводами. Реалізовано механізм стабілізації камери за осями нахилу та крену, що дозволяє компенсувати кутові відхилення літального апарата під час польоту.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						4
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ТЕМИ

1.1 Особливості стабілізації камер у FPV-дронах

FPV-дрони на сьогоднішній день мають широкий спектр застосування та діяльності. Наприклад аерозйомка, моніторинг території, військова сфера, спортивні змагання, спеціалізовані технічні завдання та випробування. Головною особливістю подібних безпілотних апаратів тещо в режимі реального часу відеосигнал передається безпосередньо оператору, що дає можливість керувати дроном від першої особи для керування.

Під час польоту FPV-дрон постійно знаходиться під впливом зовнішніх дій та внутрішніх факторів, які можуть негативно впливають на стан камери та системи. До внутрішніх факторів відносяться вібрації від роботи електро-двигунів, обертання пропелерів, а також механічні коливання конструкції корпусу. Зовнішні фактори включають пориви вітру, зміна повітряних потоків, різкі зміни швидкості та напрямку руху. Усі ці явища спричиняють нахили, ривки та тремтіння камери, що призводить до погіршення якості відеозображення, що передається оператору.

Особливо відчутна проблема стабілізації проявляється у FPV-дронах через специфіку їх використання. Такі прилади можуть виконувати швидкі рухи, різкі повороти, стрімкі набори висоти та пікірування. Під час виконання подібних маневрів виникають значні кутові прискорення, які миттєво передаються на корпус дрона та камеру. Якщо система стабілізації платформи відсутня або працює недостатньо ефективно, оператор отримує нестабільне зображення з високим рівнем шуму та коливань, що значно ускладнює керування безпілотним літальним апаратом [1], [2].

1.2 Аналіз методів стабілізації

Методи стабілізації можна розглядати як сукупність різних підходів, які відрізняються принципом компенсації небажаних рухів та рівнем складності

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						5
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

реалізації. Найпростішим є метод пасивної стабілізації, який не використовує електроніки або систем керування. У цьому випадку зменшення коливань досягається за рахунок конструктивних елементів, таких як демпфери, гумові амортизатори, пружини або спеціальні вібропоглинаючі матеріали. Такий підхід дозволяє ефективно гасити високочастотні вібрації, однак він не здатний компенсувати зміну орієнтації об'єкта у просторі [3].

Більш складним є метод механічної стабілізації, який базується на використанні карданних підвісів або балансувальних конструкцій. Завдяки інерційним властивостям та механічному розв'язанню осей обертання камера може частково зберігати своє положення незалежно від рухів носія. Проте точність такого методу обмежена, і він не забезпечує активної компенсації динамічних змін [4].

Наступним рівнем є електронна стабілізація, яка реалізується за допомогою цифрової обробки сигналу або відеозображення. Спеціальні алгоритми аналізують рух кадру та компенсують небажані зміщення шляхом програмної корекції. Такий метод широко застосовується у сучасних камерах і дозволяє покращити плавність зображення без додаткових механічних систем, однак може призводити до втрати частини кадру та збільшення затримки.

Гіроскопічна стабілізація базується на використанні гіроскопів для вимірювання кутових швидкостей об'єкта. Отримані дані застосовуються для компенсації обертальних рухів у реальному часі. У поєднанні з акселерометрами цей метод дозволяє значно підвищити точність визначення орієнтації та широко використовується у безпілотних літальних апаратах [5].

Інерціальна стабілізація є розвитком гіроскопічного підходу і використовує вимірювальні модулі, які можуть включати гіроскоп, акселерометр а інколи й магнітометр. Об'єднання даних цих датчиків дозволяє отримати більш точну оцінку положення об'єкта у просторі та забезпечити стабільну роботу системи навіть при складних маневрах.

Окрему групу становить стабілізація на гimbалах, яка є активним методом керування положенням камери. У таких системах камера встановлюється на

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						6
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

рухому платформу з електродвигунами або сервоприводами, які компенсують рухи носія по одній, двох або трьох осях. Це дозволяє підтримувати стабільний горизонт і значно зменшувати вплив вібрацій та різких змін положення.

У сучасних гімбальних системах широко застосовується ПД-регулювання, яке забезпечує точне керування приводами. Регулятор аналізує різницю між бажаним і фактичним положенням та формує керуючий сигнал, що дозволяє швидко та плавно компенсувати відхилення. Завдяки своїй простоті та ефективності ПД-регулятори є стандартом у системах стабілізації [6].

Для підвищення точності визначення орієнтації також використовуються кватерніони, які дозволяють уникнути проблеми втрати ступенів свободи, відомої як складання рамок. На відміну від кутів Ейлера, кватерніони забезпечують безперервне та стабільне представлення просторових обертів без сингулярностей, що особливо важливо при великих кутах нахилу та складних маневрах.

Окремо виділяють адаптивні методи стабілізації, які здатні змінювати свої параметри залежно від умов роботи системи. Такі алгоритми підлаштовуються під зміну навантаження, рівень вібрацій або динаміку руху, забезпечуючи більш точну та стійку роботу [7].

Також широко застосовуються методи об'єднання даних датчиків, відомі як *sensor fusion*. Вони використовують різні фільтри та алгоритми використовують дані з різних датчиків для більш точної оцінки положення. Це дозволяє компенсувати недоліки окремих датчиків і забезпечити стабільну та надійну роботу системи стабілізації у реальному часі [8], [9].

1.3 Огляд MEMS-гіроскопа та принцип роботи

MEMS-гіроскоп – це мініатюрний датчик кутової швидкості, який використовується для вимірювання обертання об'єкта відносно однієї або кількох осей. Він є складовою частиною технології MEMS, що об'єднує в одному мікрочипі механічні мікроструктури та електронні схеми обробки сигналів.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						7
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Завдяки цьому MEMS-пристрої можуть бути дуже компактними, енергоефективними та придатними для масового використання в мобільних пристроях, дронах, автомобільних системах стабілізації та робототехніці [8].

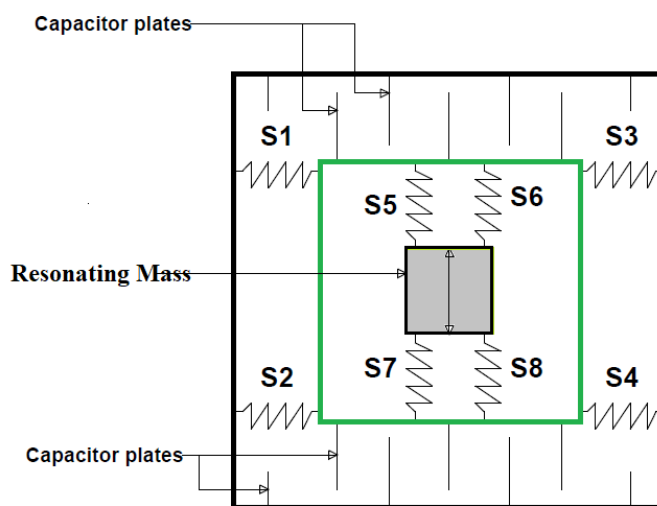


Рисунок 1.3 – Приклад будови MEMS-гіроскопа

Принцип роботи MEMS-гіроскопа базується на явищі Коріоліса. Усередині чипа знаходиться мікромеханічна структура – зазвичай це коливальна маса яка приводиться в постійний коливальний рух за допомогою електростатичного або електромагнітного збудження. Коли система перебуває в стані спокою, коливання відбуваються строго вздовж заданої осі. Однак при обертанні пристрою виникає сила Коріоліса, яка відхиляє траєкторію руху цієї маси у перпендикулярному напрямку. Це відхилення пропорційне кутовій швидкості обертання [10].

Вбудовані сенсори фіксують це мікроскопічне зміщення, перетворюючи його в електричний сигнал. Далі цей сигнал підсилюється, фільтрується та оцифровується вбудованим аналого-цифровим перетворювачем. Після обробки формується цифрове значення кутової швидкості по відповідній осі, яке може бути передане через інтерфейси до мікроконтролера.

У контексті гіростабілізованих систем, наприклад камер FPV-дронів, MEMS-гіроскоп використовується для постійного вимірювання кутових швидкостей платформи. Отримані дані інтегруються в часі для визначення кутів

відхилення, після чого система керування формує компенсуючі сигнали для сервоприводів або безщіткових моторів. Таким чином досягається стабілізація зображення незалежно від рухів дрона. Важливою особливістю MEMS-гіроскопів є їхня чутливість до шумів і дрейфу нуля, тому в практичних системах вони часто використовуються разом з акселерометрами та алгоритмами фільтрації, такими як комплементарний фільтр або фільтр Калмана, що дозволяє підвищити точність визначення орієнтації в просторі.

1.4 Обґрунтування вибору підходу до стабілізації.

Під час розроблення гіростабілізованої платформи камери FPV-дрона суттєвим моментом є підбір методу стабілізації, який забезпечуватиме точне отримання напрямку камери незалежно від нахилів та вібрацій літального апарата. Для реалізації систем стабілізації може використовувати різні підходи або декілька одночасно, кожен з яких має власні вигоди та вади.

Простішим методом виступає механічна стабілізація, при якій використовуються демпфери або пасивні підвіси. Такий підхід дозволяє частково зменшити вплив вібрацій, однак не забезпечує компенсацію кутових відхилень дрона у просторі. Крім того, механічна стабілізація має низьку ефективність при різких маневрах та зміні положення літального апарата.

Трохи кращім підходом є стабілізація на основі акселерометрів. Акселерометри дозволяють отримати напрямок вектора, сили тяжіння та оцінювати кут нахилу дрону. Проте при наявності прискорень, вібрацій або різких змін швидкості точність таких вимірювань значно погіршується. Це особливо критично для FPV дронів, які працюють у динамічних режимах польоту.

Модуль Bosch BNO055 має вбудований в себе мікропроцесор для обробки даних сенсорів та реалізує алгоритми sensor fusion, що дозволяє отримувати вже готові кватерніони орієнтації. Це значно спрощує програмну реалізацію системи стабілізації та зменшує навантаження на основний мікроконтролер STM32.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						9
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Для представлення орієнтації обрано кватерніонний підхід. На відміну від кутів Ейлера, кватерніони не мають проблеми складання рамок та забезпечують плавний опис обертання у тривимірному просторі. Це особливо важливо для FPV-дронів, де можливі швидкі та складні маневри з великими кутами нахилу.

Складання рамок(gimbal-lock) – це момент втрати одного зі ступенів свободи обертання, яке може виникнути під час опису просторової орієнтації об'єкта за допомогою кутів Ейлера. Кути Ейлера описують положення тіла у просторі через послідовні обертання навколо трьох осей — крену (Roll), тангажу (Pitch) та рискання (Yaw). Такий спосіб опису орієнтації найчастіше використовуваним, тому широко використовується у системах керування, авіації, відеоіграх, робототехніці та стабілізаційних платформах. Однак при певних положеннях об'єкта виникає математична особливість, через яку система втрачає можливість коректно описувати незалежне обертання по всіх трьох осях.

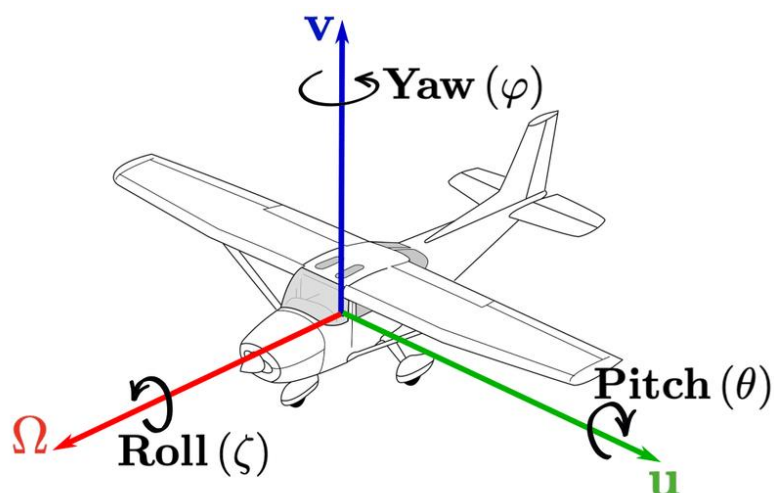


Рисунок 1.4 – Розміщення осей обертання

Проблема складання рамок в той момент коли один із кутів Ейлера, зазвичай це тангаж, досягає значення приблизно 90 градусів. У цей момент дві осі обертання фактично вирівнюються та стають паралельними одна одній. Через це система втрачає один ступінь свободи, а два різні типи обертання починають описуватись однаково. Наприклад, після повороту по тангажу на 90 градусів обертання по крену та рисканням стають еквівалентними, тому система вже не може коректно визначити, навколо якої саме осі виконується рух. У результаті

виникають помилки орієнтації, нестабільність обчислень та різкі стрибки значень кутів.

У гіростабілізованих системах та FPV-дронах це явище є особливо небезпечним, оскільки під час агресивних маневрів дрон часто виконує великі кути нахилу та піддається зовнішнім факторам та віюрації від самої конструкції. Якщо система стабілізації використовує лише кути Ейлера, то при досягненні критичних положень можливе порушення роботи алгоритмів стабілізації, некоректна робота PID-регуляторів та втрата стабільного горизонту у відеопотоці. Через це платформа камери може почати різко змінювати положення або втрачати плавність компенсації рухів.

Саме через наявність проблеми складання рамок у сучасних системах орієнтації та стабілізації дедалі частіше використовують кватерніони. На відміну від кутів Ейлера, кватерніони дозволяють описувати обертання у тривимірному просторі без втрати ступенів свободи. Вони забезпечують плавну інтерполяцію поворотів, стабільну роботу алгоритмів та коректне визначення орієнтації при будь-яких кутах нахилу, що особливо важливо для систем керування FPV-дронами, IMU-модулів і гіростабілізованих платформ камер.

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) – це один із найбільш поширених методів керування електронними пристроями, який базується на зміні тривалості імпульсів при незмінній частоті сигналу. Принцип роботи ШІМ полягає у тому, що електронний ключ періодично вмикається та вимикається з великою швидкістю, а середнє значення напруги або потужності визначається співвідношенням часу увімкненого стану до повного періоду сигналу.

Основною характеристикою ШІМ є коефіцієнт заповнення, який показує, яку частину часу сигнал перебуває у активному стані. Якщо імпульс займає невелику частину періоду, середня потужність буде малою. Якщо ж тривалість імпульсу збільшується, зростає і середнє значення напруги або струму на навантаженні. Таким чином, змінюючи ширину імпульсів, можна плавно регулювати роботу різноманітних електронних систем без значних втрат енергії.

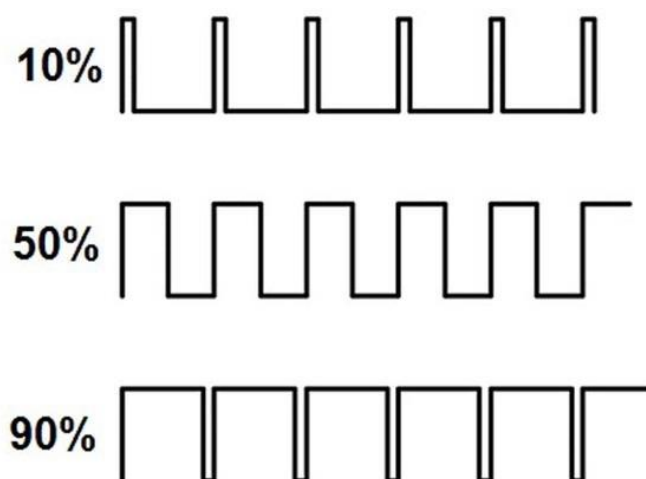


Рисунок 1.5 – Приклад коефіцієнтів заповненості.

Широтно-імпульсна модуляція широко використовується у сучасній електроніці завдяки своїй високій ефективності та простоті реалізації. На відміну від аналогового способу регулювання, де частина енергії розсіюється у вигляді тепла, ШІМ дозволяє керувати потужністю шляхом швидкого перемикання ключового елемента між станами “увімкнено” та “вимкнено”. Оскільки у цих режимах втрати мінімальні, такий метод забезпечує високий коефіцієнт корисної дії системи.

Технологія ШІМ активно застосовується у джерелах живлення, стабілізаторах напруги, драйверах електродвигунів, системах керування сервоприводами, світлодіодному освітленні та мікроконтролерних системах. Особливо важливу роль широтно-імпульсна модуляція відіграє у системах керування безпілотними літальними апаратами та FPV-дронами. За допомогою ШІМ мікроконтролер формує сигнали для регуляторів обертів двигунів, сервоприводів гімбалів та інших виконавчих механізмів.

У системах стабілізації камер ШІМ використовується для точного керування положенням сервоприводів або безщіткових моторів стабілізатора. Змінюючи тривалість імпульсів, система може плавно регулювати кут повороту камери та компенсувати рухи дрона у реальному часі. Це дозволяє забезпечити стабільне положення горизонту та зменшити вплив вібрацій і різких маневрів на відеопотік.

Ще однією важливою перевагою ШІМ є можливість цифрової реалізації. Сучасні мікроконтролери мають вбудовані таймери та апаратні модулі генерації ШІМ-сигналів, що дозволяє формувати високоточні імпульси без значного навантаження на процесор. Завдяки цьому широтно-імпульсна модуляція стала стандартним методом керування у вбудованих системах, робототехніці, промисловій автоматизації та авіаційній електроніці.

Таким чином, широтно-імпульсна модуляція є ефективним та універсальним способом керування електронними системами, який дозволяє точно регулювати потужність, швидкість або положення виконавчих механізмів при мінімальних енергетичних втратах. Саме завдяки простоті, надійності та високій ефективності ШІМ сьогодні використовується практично у всіх сучасних цифрових системах керування.

У моїй системі стабілізації використовується алгоритм пропорційної компенсації кутів. Після отримання кватерніонів вони перетворюються у кути Ейлера, на основі яких формується ШІМ-сигнал для сервоприводів. Сервоприводи повертають платформу у напрямку, протилежному нахилу дрона, компенсуючи зміну положення камери.

Також система керування програмно переведена на роботу від зовнішнього кварцового резонатора. Це рішення дозволило підвищити загальну точність та стабільність тактування мікроконтролера, оскільки зовнішній кварц забезпечує більш стабільну опорну частоту у порівнянні з внутрішніми генераторами, які мають більші відхилення під впливом температури, напруги живлення та технологічного розкиду параметрів.

Завдяки використанню зовнішнього кварцу забезпечується еталонна точність роботи апаратних таймерів мікроконтролера, які формують високочастотні ШІМ-сигнали для керування сервоприводами гіростабілізованої платформи під камеру FPV-дрона. Саме точність цих таймерів напряму впливає на коректність формування імпульсів керування та стабільність положення виконавчих механізмів.

Покращення точності формування ШІМ-сигналів дозволяє зменшити похибки керування сервоприводами, що в результаті підвищує плавність руху платформи та зменшує небажані коливання під час компенсації кутових відхилень. Це особливо важливо для систем гіростабілізації, де навіть незначні часові неточності можуть впливати на якість стабілізації платформи.

Таким чином, переведення системи на зовнішній кварцовий резонатор є важливим етапом підвищення точності та надійності роботи програмно-апаратної частини модуля керування гіростабілізованою платформою FPV-дрона.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		14

2 ПРИНЦИП РОБОТИ ПРОСТАБІЛІЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ

2.1 Отримання даних орієнтації з MEMS датчика BNO055

BNO055 є інтегрованим інерційним вимірювальним модулем, який поєднує три основні сенсорні підсистеми: триосьовий акселерометр, триосьовий гіроскоп та триосьовий магнітометр. Головною особливістю модуля є наявність вбудованого мікроконтролера з алгоритмами сенсорного ф'южну, що дозволяє отримувати вже оброблені дані орієнтації без необхідності реалізації складних фільтрів на стороні основного контролерах [11].



Рисунок 2.2.1 – Модуль BNO055

Архітектурно BNO055 складається з двох рівнів обробки даних. Перший рівень – це первинні сенсори, які вимірюють фізичні величини (прискорення, кутову швидкість та магнітне поле). Другий рівень — це внутрішній процесор Bosch, який виконує алгоритми калібрування, компенсації похибок та об'єднання даних у єдину модель просторової орієнтації.

Вихідні дані можуть бути представлені у вигляді кутів Ейлера, векторів або кватерніонів, що робить датчик зручним для використання в системах стабілізації рухомих платформ.

Режим NDOF є основним режимом роботи BNO055 у системах стабілізації. У цьому режимі всі три сенсорні підсистеми (акселерометр, гіроскоп і магнітометр) працюють одночасно та обробляються внутрішнім алгоритмом злиття даних.

Основна перевага режиму NDOF полягає у формуванні абсолютної орієнтації простору без необхідності зовнішніх обчислень фільтрів Калмана або комплементарних фільтрів. Це значно спрощує програмну реалізацію та зменшує навантаження на мікроконтролер.

У результаті система отримує стабільний вихід у вигляді кватерніона або кутів Ейлера, які можуть безпосередньо використовуватися для керування сервоприводами гіростабілізованої платформи.

2.2 Отримання даних орієнтації з MEMS датчика BNO055

Для визначення просторового положення двовісної стабілізованої платформи у реальному часі було обрано MEMS-датчик абсолютної орієнтації BNO055 виробництва Bosch Sensortec. Цей компонент являє собою систему яка об'єднує три типи чутливих елементів — акселерометр, гіроскоп та магнітометр, що виконує фірмове програмне забезпечення злиття даних. Завдяки такій архітектурі BNO055 самостійно обробляє сирі сенсорні дані та надає кінцеву орієнтацію без додаткового навантаження на головний мікроконтролер системи, що є критичним для забезпечення високої частоти оновлення що є важливим для стабілізації.

BNO055 є гнучким у підключенні пристроєм завдяки підтримці декількох цифрових інтерфейсів зв'язку, що дозволяє інтегрувати його в різноманітні системи – від простих мікроконтролерних платформ до складних обчислювальних комплексів. Згідно з офіційною технічною документацією, BNO055 підтримує два основні типи цифрових інтерфейсів: I2C також можливе використання протоколу HID-I2C та UART. Вибір активного інтерфейсу здійснюється апаратно за допомогою конфігурації двох виводів мікросхеми – PS1 та PS0. Такий підхід дозволяє однозначно визначити режим роботи при старті системи.

UART та I2C – це два фундаментальні протоколи, які використовуються в електроніці для обміну даними між мікроконтролерами, датчиками та іншими

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						16
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

пристроями. Вони вирішують зовсім різні завдання і працюють за різними принципами. Починаючи з UART, що розшифровується як універсальний асинхронний приймач-передавач, варто зазначити, що це дуже старий і неймовірно простий протокол, який буде зв'язок за принципом "точка-точка", тобто дозволяє спілкуватися лише двом пристроям безпосередньо один з одним. Для цього йому потрібно всього два дроти: TX (передавач) та RX (приймач), причому TX одного пристрою з'єднується з RX іншого, і навпаки.

Головна особливість UART полягає в тому, що він є асинхронним, тобто у нього немає окремого проводу для тактового сигналу, який би задавав ритм передачі. Замість цього два пристрої заздалегідь домовляються про швидкість передачі даних, так званий бітрейт (наприклад, 9600 або 115200 біт за секунду), і якщо ці швидкості хоч трохи різняться, дані перетворюються на безладний шум. Така простота робить UART ідеальним вибором для налагоджувального зв'язку наприклад між платою та комп'ютером, а також для підключення GPS-модулів або старих Bluetooth-адаптерів, але через асинхронність він чутливий до перешкод і не дозволяє підключити третій пристрій до тих самих двох дротів.

Зовсім інакше поводить протокол I2C. Він розшифровується як Inter-Integrated Circuit і був розроблений компанією Philips спеціально для створення шини з багатьма пристроями на одній друкованій платі. Для роботи I2C також потрібно лише два дроти, але це лінія даних SDA та лінія тактового сигналу SCL, що робить його синхронним протоколом: ведучий пристрій (Master) генерує тактові імпульси на лінії SCL, задаючи темп передачі, завдяки чому дані передаються набагато надійніше без потреби в точному узгодженні швидкості.

Найважливіша особливість I2C полягає в тому, що до одних і тих самих двох проводів можна підключити до сотні різних пристроїв, оскільки кожен із них має свою унікальну 7-бітну адресу. Ведучий починає сеанс зв'язку з того, що відправляє адресу потрібного йому підлеглого пристрою (Slave), і всі інші просто ігнорують подальші команди. Саме завдяки адресації I2C став незамінним там, де потрібно зібрати дані з багатьох датчиків одночасно, наприклад, акселерометрів, гіроскопів, датчиків температури та вологості на зразок

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						17
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

BME280, модулів реального часу RTC або маленьких OLED-дисплеїв, оскільки це економить величезну кількість висновків мікроконтролера.

Підсумовуючи, головна відмінність між UART та I2C зводиться до наступного: UART чудово підходить для простого дуплексного зв'язку між двома пристроями, які можуть одночасно говорити і слухати, але не терпить присутності третього зайвого, тоді як I2C дозволяє побудувати цілу мережу з багатьох пристроїв на двох проводах, де кожен має свою адресу, проте швидкість передачі в ньому зазвичай нижча, і він вимагає наявності підтягуючих резисторів на лініях.

2.3 Похибки вимірювання та дрейф MEMS датчиків

Точність сучасних MEMS-сенсорів (акселерометрів, гіроскопів, магнітометрів) суттєво обмежується низкою фізичних та технологічних факторів, які призводять до похибок вимірювань та часового дрейфу вихідних сигналів.

Усі похибки MEMS-датчиків можна поділити на систематичні та випадкові. Першою великою групою є технологічні похибки. Через недосконалість процесів травлення кремнію, геометрія пружних підвісів ніколи не є ідеальною, що викликає ненульове зміщення нуля навіть за відсутності зовнішнього впливу. Крім того, через неточності монтажу кристала осі чутливості датчика не збігаються з осями корпусу і призводить до перехресних впливів, коли, наприклад, обертання навколо осі X частково реєструється гіроскопом осі Y.

Другою групою є електричні шуми. Серед них домінують тепловий шум Джонсона-Найквіста механічних елементів та низькочастотний напівпровідникових, який стає особливо помітним при вимірюванні дуже повільних рухів або статичних положень. Окремо варто виділити механічні зовнішні впливи – вібрації можуть сприйматися гіроскопом як хибне обертання, а сильні удари здатні тимчасово або навіть незворотно змістити внутрішні структури.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						18
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Температура є одним із найсильніших дестабілізуючих факторів, оскільки більшість MEMS-датчиків мають працювати в діапазоні від мінус 40 до плюс 85 градусів Цельсія. Механізм температурного впливу є комплексним. По-перше, модуль пружності кремнію залежить від температури, що змінює жорсткість пружних підвісів і, відповідно, масштабний коефіцієнт датчика. По-друге, через різницю в коефіцієнтах теплового розширення кремнієвого кристалу, його корпусу та клеючих матеріалів, виникають термомеханічні напруження, які «вигинають» чутливу структуру і спричиняють дрейф нуля. По-третє, змінюються параметри вбудованої електроніки – підсилювачів та аналого-цифрових перетворювачів.

Наслідки цього можуть бути катастрофічними для точності: наприклад, дрейф нуля MEMS-гіроскопа може змінюватись на десятки градусів за годину при зміні температури всього на 10°C, якщо не застосовувати компенсацію. Тому сучасні датчики або термостатуються або частіше використовують програмну компенсацію де на основі показань вбудованого термодатчика розраховуються калібровка.

Найбільш критичною проблемою інерціальних систем на основі MEMS є не окремі похибки, а їхнє накопичення в процесі інтегрування. Гіроскопи вимірюють кутову швидкість, а для отримання кута її потрібно проінтегрувати за часом. Якщо у вимірній швидкості присутнє постійне зміщення (bias), то похибка кута зростає лінійно в часі: за годину bias у 1 градус за годину дасть похибку кута в 1 градус. Для недорогих MEMS-гіроскопів типовий дрейф становить від 1 до 50 градусів за годину, тому вже за кілька хвилин автономної роботи без корекції визначення орієнтації стає незадовільним.

Ще гірша ситуація з визначенням положення в просторі: для отримання координати необхідно двічі проінтегрувати сигнал акселерометра. Тут зміщення нуля акселерометра призводить до квадратичного зростання похибки положення за удвічі більший час похибка зростає вчетверо. Крім того, існує ефект Шулера. Якщо внаслідок похибки гіроскопа система неправильно визначає напрям на вертикаль, то вона «бачить» складову гравітації як горизонтальне прискорення,

що породжує додаткові помилки швидкості та позиції з періодом близько 84 хвилин.

Для боротьби з накопиченням помилок використовують методи злиття даних – найпоширенішими є фільтр Маджвіка для швидких обчислень та розширений фільтр Калмана, який періодично коригує дрейф гіроскопа за показаннями акселерометра та магнітометра. Таким чином, хоча окремі похибки MEMS-датчиків неминучі, правильне калібрування, температурна компенсація та алгоритмічне злиття даних дозволяють досягти прийнятної точності для більшості практичних застосувань.

2.4 Методи компенсації похибок

Компенсація похибок MEMS-датчиків у складі гіростабілізованої платформи є багаторівневим завданням, що охоплює апаратні, алгоритмічні та адаптивні підходи. Сучасна методологія базується на чотирьох основних напрямках компенсації: модальне узгодження, компенсація механічних напружень, температурна компенсація та фазова компенсація, які в комплексі дозволяють суттєво підвищити точність вимірювань.

Почнемо з модального узгодження, яке спрямоване на мінімізацію різниці частот між збуджувальною та чутливою модами коливань MEMS-гіроскопа. Частотне розщеплення є одним із ключових джерел дрейфу нуля, оскільки призводить до появи квадратурної помилки та зменшення чутливості.

Традиційний підхід полягає в пасивному узгодженні частот на етапі виробництва, однак його ефективність обмежена через температурну залежність механічних властивостей кремнію. Цей метод дозволяє динамічно компенсувати зміни добротності коливальної системи, які виникають через зовнішні впливи. Перевагою підходу є можливість підтримувати оптимальне співвідношення сигнал/шум у широкому діапазоні робочих температур. Однак модальне узгодження має обмеження. Воно ефективне переважно для гіроскопів, що працюють у розімкненому контурі. Вплив частотного розщеплення на

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						20
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

масштабний коефіцієнт стає незначним. Тому для високоточних замкнених систем цей метод не є пріоритетним.

Другим важливим напрямком є компенсація механічних напружень. Механічні напруження, що виникають через різницю коефіцієнтів теплового розширення кремнієвого кристала, корпусу та клеючих матеріалів, є суттєвим джерелом дрейфу нуля. Традиційні методи компенсації напружень включають температурну обробку, оптимізацію конструкції корпусу та використання спеціальних демпфуючих матеріалів. Найбільш перспективним напрямком є інтеграція сенсорів напружень безпосередньо в структуру MEMS. Цей метод передбачає розміщення на кристалі розподілених датчиків механічної деформації, сигнали з яких використовуються для розрахунку компенсаційних коефіцієнтів. Шляхом апроксимації залежності між виміряними напруженнями та вихідним сигналом датчика визначаються коефіцієнти компенсації. Недоліком підходу є його пасивний характер – це пост-обробка, а не активна компенсація.

Температурна компенсація є найбільш дослідженим напрямком, оскільки температура впливає практично на всі фізичні параметри MEMS-структур. Методи поділяються на апаратні та пасивні програмні. Апаратні методи включають термостатування, оптимізацію температурних характеристик схем та спеціальне проєктування компенсаційних структур. Основним недоліком апаратних методів є високе енергоспоживання та збільшення габаритів. Традиційним підходом є поліноміальна апроксимація (як правило, третього порядку), де на основі показань вбудованого термодатчика розраховується поправка до вихідного сигналу. Однак поліноміальний метод не враховує нелінійності, властиві температурним залежностям похибок MEMS-датчиків, що обмежує його точність.

Фазова компенсація спрямована на усунення фазових зсувів між збуджувальним та чутливим каналами, які виникають через паразитні ємності, неідеальність підсилювачів та температурні зміни характеристик електроніки. Фазові помилки особливо критичні для гіроскопів. Оскільки вони безпосередньо

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						21
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

впливають на точність вимірювання кутової швидкості. Сучасні методи фазової компенсації включають пряме вимірювання та компенсацію фазової помилки за допомогою вбудованих тестових сигналів, моделювання залежності фазової помилки від температури з подальшою компенсацією, адаптивну компенсацію на основі рекурсивного методу найменших квадратів та автоматичне калібрування фази методом бісекції. Покращений адаптивний контролер є одним із найбільш перспективних напрямків, який інтегрує автоматичне калібрування фази з електростатичним підлаштуванням жорсткості.

Важливим аспектом є методи злиття даних які об'єднують показання гіроскопів, акселерометрів та магнітометрів. Класичним рішенням є використання фільтрів Калмана, які враховують статистичні характеристики похибок кожного сенсора. Спосіб особливо ефективним для систем з високою нелінійністю, оскільки він лінеаризує не весь простір станів, а лише компоненту похибки, що забезпечує кращу чисельну стабільність. Альтернативою фільтру Калмана є комплементарний фільтр, який у багатьох випадках демонструє кращі динамічні характеристики.

Таким чином, сучасна методологія компенсації похибок для гіростабілізованої платформи базується на трьох рівнях: апаратному (конструкція датчика, термостабілізація, сенсори напружень), алгоритмічному (фільтри Калмана, комплементарні фільтри) . Найкращі результати досягаються при поєднанні методів машинного навчання для декомпозиції та фільтрації сигналу та злиття даних від різнотипних сенсорів. Такий комплексний підхід дозволяє знизити нестабільність нуля на порядки та забезпечити точність, необхідну для більшості практичних застосувань гіростабілізованих платформ.

2.5 Принципи компенсації руху платформи

Принципи компенсації руху гіростабілізованої платформи базуються на реалізації замкненої системи керування, яка забезпечує автоматичне підтримання заданого просторового положення камери незалежно від коливань

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						22
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

корпусу дрона. Під час польоту платформа постійно зазнає дії зовнішніх збурень, що виникають через роботу двигунів, пориви вітру та маневри апарата, які призводять до відхилень по осях крену, тангажу та ристання. Для усунення цих відхилень використовується принцип негативного зворотного зв'язку, коли система безперервно вимірює поточну орієнтацію за допомогою MEMS-датчиків, порівнює її із заданою еталонною орієнтацією та формує керуючий сигнал, що компенсує похибку через виконавчі механізми, такі як сервоприводи або безщіткові двигуни.

Математично процес компенсації можна описати як різницю між заданим і вимірним кутовим положенням, що формує сигнал похибки, який далі обробляється регулятором. Найчастіше використовується PID-регулятор, який враховує пропорційну, інтегральну та диференціальну складові, що дозволяє досягти одночасно швидкої реакції системи та її стабільності без зайвих коливань. Пропорційна складова забезпечує базову компенсацію відхилення, інтегральна усуває статичну похибку, а диференціальна підвищує стійкість системи до різких змін руху.

Для більш точного опису просторової орієнтації та уникнення проблеми складання рамок застосовуються кватерніони, які дозволяють компактно та безсингулярно представляти тривимірні обертання. Поточна та еталонна орієнтація задаються у вигляді кватерніонів, а похибка визначається через їх відносне множення, після чого результат може бути перетворений у кути Ейлера або безпосередньо у керуючі сигнали для сервоприводів. Це забезпечує більш стабільну та точну роботу системи при складних просторових маневрах.

Крім того, у системі компенсації широко застосовуються методи фільтрації сигналів, такі як комплементарний або фільтр Калмана, які дозволяють зменшити вплив шумів датчиків та дрейфу гіроскопа. У сукупності всі ці підходи формують ефективну систему стабілізації, яка забезпечує плавне утримання камери у заданому напрямку навіть за умов інтенсивних динамічних навантажень, характерних для FPV-польоту.

Отже, ефективна компенсація руху гіростабілізованої платформи є ключовою умовою стабільної роботи FPV-камери в умовах динамічних навантажень під час польоту. Реалізація системи на основі замкненого контуру керування з негативним зворотним зв'язком дозволяє безперервно відстежувати відхилення просторової орієнтації та оперативно їх компенсувати шляхом формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів. Використання PID-регулятора забезпечує необхідний баланс між швидкістю реакції системи та її стійкістю, що дозволяє мінімізувати коливання та перерегулювання при різких змінах положення дрона.

Застосування кватерніонного опису орієнтації значно підвищує точність обчислень та усуває проблему гімбал-локу, що особливо важливо при складних просторових обертаннях. Додатково використання цифрових фільтрів дозволяє зменшити вплив шумів та похибок вимірювання, що виникають у MEMS-датчиках, та стабілізувати роботу системи в реальних умовах експлуатації.

Таким чином, поєднання апаратної частини вимірювання та програмних алгоритмів обробки даних забезпечує високу ефективність гіростабілізованої платформи, гарантуючи плавне та точне утримання камери в заданому напрямку навіть при інтенсивних вібраціях і маневрах FPV-дрона.

2.6 Переваги використання STM32

Мікроконтролери STM32 вирізняються високою продуктивністю та масштабованістю завдяки 32-розрядним ядрам ARM Cortex-M, які здатні виконувати складні завдання на частотах до 400 МГц. Вони однаково добре підходять як для простих побутових гаджетів, так і для потужних промислових систем, пропонуючи широкий діапазон серій – від базової STM32F0 до високопродуктивної STM32H7.

Однією з ключових переваг є надзвичайно низьке енергоспоживання, що робить STM32 ідеальним вибором для портативних та акумуляторних пристроїв. Наприклад, моделі STM32L0 споживають лише 49 мкА/МГц в активному

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		24

режимі, а в режимі супернизького споживання – лише 230 нА в режимі збереження регістрів або 340 нА в режимі активного таймера. Крім того, швидкий вихід із режиму сну за 3.5 мкс є критично важливим для застосунків, чутливих до часу.

STM32 також пропонує багату периферію та інтегровані можливості, включаючи підтримку різноманітних інтерфейсів: UART, SPI, I2C, CAN, сучасний USB Type-C з Power Delivery, а також таймери високої роздільної здатності. Розширені аналогові функції, такі як 16-бітні АЦП, компаратори, операційні підсилювачі та ЦАП, значно спрощують проектування пристроїв.

Гнучке керування живленням реалізовано через динамічне регулювання напруги та різні режими сну. Це дозволяє точно налаштовувати енергоефективність під конкретне завдання. Нарешті, широкий вибір серій під будь-які задачі – STM32F (баланс ціни та продуктивності), STM32L (ультранизьке енергоспоживання для носимих пристроїв та IoT), STM32H (максимальна швидкість до 400 МГц для складних обчислень у робототехніці та промисловості), а також STM32WB/WL із вбудованою бездротовою підтримкою (Bluetooth Low Energy, LoRa) – робить STM32 універсальним рішенням для будь-яких застосовань: від побутової електроніки до критично важливих промислових і автомобільних систем.

2.7 Переваги обраного мікроконтролера

STM32F303CCT6 – це високопродуктивний 32-бітний мікроконтролер із змішаними сигналами на основі ядра ARM Cortex-M4 з частотою до 72 МГц. Він належить до серії STM32F3, яка позиціонується STMicroelectronics як основна лінійка для задач, що вимагають поєднання обчислювальної потужності та розширених аналогових можливостей. Є ідеальним вибором для складних алгоритмів цифрової обробки сигналів, систем керування та промислової автоматизації. Завдяки своїм унікальним характеристикам, цей MCU займає нішу між звичайними Cortex-M4 контролерами та спеціалізованими

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		25

сигнальними процесорами, пропонуючи оптимальний баланс ціни, продуктивності та інтеграції [2], [3].

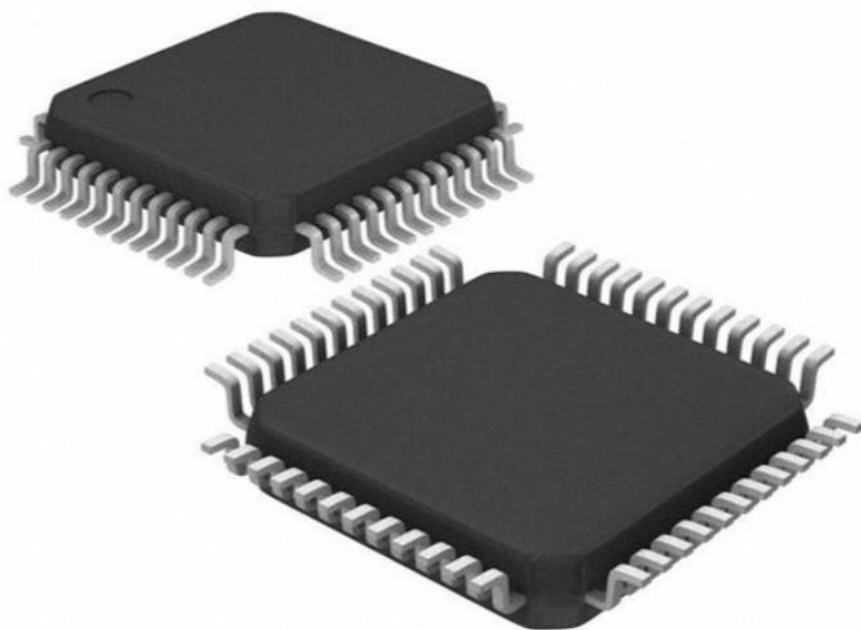


Рисунок 2.7.1 – Мікроконтролер STM32F303CCT6

Ядро ARM Cortex-M4 забезпечує продуктивність, що дозволяє виконувати ресурсоємні задачі в реальному часі . Мікроконтролер оснащений 256 КБ флеш-пам'яті та 40 КБ SRAM . Ключовою особливістю є наявність 8 КБ спеціалізованої пам'яті Core Coupled Memory, яка підключена безпосередньо до ядра і працює на повній швидкості без тактів очікування . Це дозволяє розміщувати критичний до часу виконання код у CCM, що підвищує продуктивність порівняно з флеш-пам'яттю. Така архітектура є значною перевагою для систем, де кожен цикл процесора на рахунок [12] , [13].

Головна відмінність серії STM32F3, і зокрема моделі STM32F303CCT6, полягає у її надзвичайно потужному аналоговому блоці, який часто порівнюють з можливостями спеціалізованих аналогових мікросхем. Він інтегрує чотири 12-бітні АЦП, що дозволяє здійснювати високошвидкісний збір даних з кількох каналів одночасно . Це критично важливо для систем векторного керування двигунами, де потрібно синхронно вимірювати струми у трьох фазах. Також у складі мікроконтролера є два 12-бітних ЦАП для формування аналогових

сигналів , сім швидких компараторів для апаратного захисту від перенапруги чи надструму , та чотири операційні підсилювачі з програмованим коефіцієнтом підсилення. Наявність дозволяє підключати датчики зі слабким сигналом. Наприклад тензодатчики або термопари без використання зовнішніх компонентів, що зменшує розмір плати та вартість кінцевого виробу.

Для задач, пов'язаних із керуванням електродвигунами та силовою електронікою, мікроконтролер оснащений двома розширеними 16-бітними таймерами керування двигунами, які підтримують генерацію ШІМ-сигналів із. Ці таймери можуть працювати на частоті до 144 МГц, забезпечуючи роздільну здатність ШІМ. Це дозволяє будувати точні та ефективні системи для керування сервоприводами, насосами, вентиляторами та іншими промисловими механізмами. Крім того, наявність загалом 10 таймерів різного призначення забезпечує гнучкість для реалізації будь-яких часових інтервалів та послідовностей .

STM32F303CCT6 пропонує багатий набір інтерфейсів зв'язку, необхідних для сучасних промислових застосувань. Він включає до трьох SPI, до двох I2C, три USART та два UART, один інтерфейс CAN 2.0B та USB 2.0 Full Speed . Загальна кількість високошвидкісних ліній введення/виведення (I/O) сягає 37, більшість з яких є 5V-tolerant . Це дозволяє безпосередньо підключати мікроконтролер до 5-вольтових промислових шин та датчиків без додаткових перетворювачів рівнів, що спрощує розробку апаратного забезпечення та підвищує надійність системи.

Завдяки своїм унікальним характеристикам, STM32F303CCT6 є оптимальним вибором для широкого спектру застосувань. Він ідеально підходить для високопродуктивного керування електродвигунами такі як промислові приводи, робототехніка, дрони, цифрових джерел живлення, промислових датчиків та вимірювальної техніки, а також для систем збору даних та обробки аудіосигналів . Підсумовуючи, STM32F303CCT6 — це спеціалізований мікроконтролер, який вирізняється на ринку завдяки безпрецедентній інтеграції аналогових компонентів поряд із потужним

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						27
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

цифровим ядром. Якщо ваша задача потребує не просто швидких обчислень, а тісної та точної взаємодії з аналоговим світом, цей MCU стане одним із найкращих рішень у лінійці STM32. Його перевірена надійність підтверджується, зокрема, використанням у серійних польотних контролерах для FPV-дронів та інших промислових виробках.

2.8 Аналіз характеристик сервоприводів

MG90S — це популярний мікро-сервопривід, який є покращеною версією широко відомого SG90. Його головна особливість — використання металевих шестерень, що забезпечує значно більшу міцність і довговічність у порівнянні з пластиковими аналогами. Це робить його чудовим вибором для різноманітних проєктів, робототехніки та легких моделей, де потрібна надійність. За технічними характеристиками, MG90S працює при напрузі від 4.8 до 6 В, забезпечуючи крутний момент від 1.8 до 2.2 кг/см при 4.8 В та до 2.8 кг/см при 6 В залежно від виробника. Швидкість обертання становить 0.10-0.11 секунди на 60 градусів при 4.8 В та прискорюється до 0.08-0.09 секунди при 6 В. Вага сервоприводу складає приблизно 13.4 грама, а стандартний кут повороту — 180 градусів.

Переваги MG90S є досить вагомими. Найголовніша з них – висока міцність завдяки металевим шестерням, які зазвичай виготовляються з латуні та алюмінію. Це робить MG90S стійким до ударів, навантажень та випадкових заклинювань, які часто призводять до поломки пластикових шестерень у молодшій моделі SG90. Крім того, покращений крутний момент дозволяє використовувати цей сервопривід у проєктах з невеликими, але вагомими навантаженнями, наприклад, у руках легких роботизованих маніпуляторів. Також варто відзначити вищу точність завдяки меншій мертвій зоні та металевим шестерням з меншим люфтом. MG90S трохи швидший за SG90, особливо при живленні 6В, і при цьому повністю сумісний з більшістю мікроконтролерів та стандартними кріпленнями.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						28
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

У порівнянні з прямим конкурентом SG90, MG90S виграє за надійністю, міцністю та швидкістю, але програє у вазі та ціні. Якщо SG90 має пластикові шестерні, низьку надійність та менший крутний момент (до 1.8 кг/см), то MG90S пропонує металеві шестерні, вищу точність, момент до 2.8 кг/см та більшу вагу (13.4 г проти 9 г). Тому сфери застосування MG90S включають роботизовані руки та маніпулятори, поворотні механізми для камер та датчиків, навчальні та аматорські проекти.

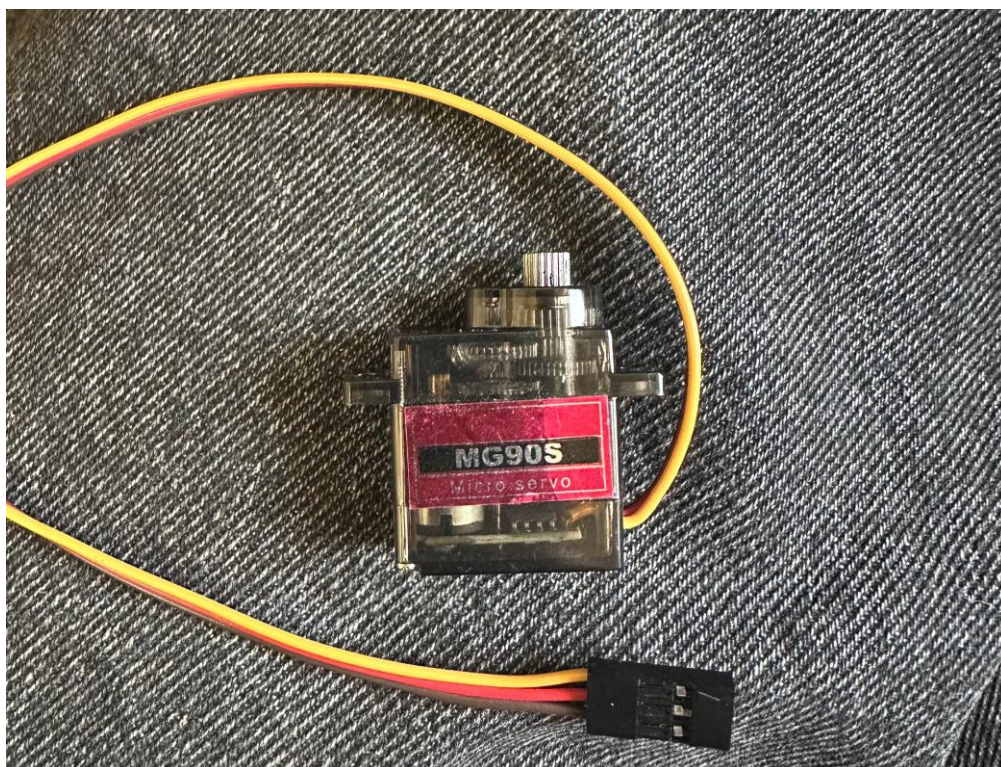


Рисунок 2.8.1 – Сервопривід MG90S

2.9 Основи математичного апарату кватерніонів

Кватерніоном називається число виду:

$$q = w + xi + yj + zk$$

де $w, x, y, z \in \mathbb{R}$, а i, j, k — уявні одиниці, які задовольняють співвідношення Гамільтона:

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$$

Звідси випливає некомутативність множення:

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		29

$$\begin{aligned}
 ij &= k \\
 ji &= -k \\
 jk &= i \\
 kj &= -i \\
 ki &= j \\
 ik &= -j \\
 ij &= k \\
 ji &= -k \\
 jk &= i \\
 kj &= -i \\
 ki &= j \\
 ik &= -j
 \end{aligned}$$

Кватерніоном називається число, яке є узагальненням комплексного числа і має одну дійсну частину та три уявні частини. Ці три уявні одиниці позначаються літерами i , j , k і підпорядковуються спеціальним правилам множення, встановленим Гамільтоном: квадрат кожної з них дорівнює мінус одиниці, а добуток усіх трьох у порядку i , j , k також дорівнює мінус одиниці. З цих правил випливає, що множення кватерніонів є некомутативним, тобто порядок співмножників важливий: наприклад, добуток i на j дорівнює k , але добуток j на i дорівнює мінус k [4], [5].

Для зручності кватерніон часто записують у вигляді пари, що складається зі скалярної частини (дійсного числа) та векторної частини (трьох дійсних чисел). Додавання кватерніонів виконується покомпонентно. Добуток двох кватерніонів виражається через скалярний та векторний добутки їх векторних частин, причому скалярна частина добутку дорівнює різниці добутку скалярів та скалярного добутку векторів, а векторна частина — сумі зважених векторів та їх векторного добутку.

Для кожного кватерніона визначено спряжений, який отримується зміною знака векторної частини. Добуток кватерніона на його спряжений дає невід'ємне дійсне число, яке називається нормою або квадратом модуля. Квадратний корінь з цієї величини називається модулем кватерніона. Якщо модуль кватерніона не

дорівнює нулю, то існує обернений кватерніон, який дорівнює спряженому, поділеному на квадрат модуля.

Одиничні кватерніони, тобто ті, чий модуль дорівнює одиниці, можна подати в експоненційній формі, яка є аналогом формули Ейлера для комплексних чисел. Такий кватерніон виражається через косинус деякого кута та синус того ж кута, помножений на одиничний вектор [14].

Головне застосування кватерніонів у прикладних науках та техніці пов'язане з описом обертань у тривимірному просторі. Одиничний кватерніон, у якого кут береться з половиною, задає поворот на цей кут навколо осі, що визначається векторною частиною. Щоб повернути довільний вектор, його спочатку подають у вигляді кватерніона з нульовою скалярною частиною, а потім виконують множення зліва на цей одиничний кватерніон і справа на обернений до нього. Результатом знову є чисто векторний кватерніон, який відповідає повернутому вектору.

Важливою особливістю є те, що кватерніон із протилежним знаком задає те саме обертання, тому відповідність між кватерніонами та обертаннями є два до-одного. Композиції кількох обертань відповідає добуток відповідних кватерніонів, причому через некомутативність порядок множення є оберненим до порядку застосування поворотів [15].

Таким чином, математичний апарат кватерніонів надає ефективний та елегантний інструмент для роботи з орієнтаціями в тривимірному просторі, що широко використовується в комп'ютерній графіці, робототехніці, навігації безпілотних апаратів та теоретичній фізиці.

2.10 Переваги кватерніонів над кутами Ейлера

У задачах тривимірної орієнтації часто виникає необхідність виконати послідовно декілька обертань, наприклад, спочатку повернути об'єкт навколо однієї осі, а потім – навколо іншої. Така операція називається композицією або складанням обертань. У термінах кватерніонів ця операція виконується

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						31
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

надзвичайно просто: якщо перше обертання задається одиничним кватерніоном q_1 , а друге – кватерніоном q_2 , то сумарне обертання відповідає добутку q_2 на q_1 (увага: порядок множення є оберненим до порядку застосування обертань, якщо мова йде про активні повороти). Іншими словами, щоб отримати кватерніон, який описує результат двох послідовних обертань, потрібно просто перемножити кватерніони цих обертань у відповідному порядку. Ця властивість робить композицію обертань універсальною та обчислювально простою: замість того щоб запам'ятовувати, в якому порядку застосовувати кути Ейлера та як при цьому змінюються координатні осі, ми просто виконуємо множення чотирьох чисел. Крім того, результат композиції залишається одиничним кватерніоном, тобто автоматично зберігає властивість норми, що важливо для чисельної стійкості.

Перша та найважливіша перевага – це відсутність проблеми складання рамок, Кути Ейлера страждають від цього явища: при певних значеннях кутів, наприклад, коли кут тангажу дорівнює 90° градусам, один зі ступенів свободи втрачається, і два різних обертання починають давати однакову орієнтацію. Це призводить до неоднозначності та помилок у керуванні, особливо в системах наведення, робототехніці та анімації. Кватерніони повністю позбавлені цього недоліку – будь-яка орієнтація в просторі описується однозначно.

Друга перевага – це компактність. Кватерніон вимагає зберігання лише чотирьох дійсних чисел, тоді як для матриці повороту потрібно дев'ять чисел, а для кутів Ейлера – три числа, але з додатковими обмеженнями. Більш вагомим є те, що композиція обертань за допомогою кватерніонів потребує значно менше арифметичних операцій, ніж множення матриць, що критично для реального часу в ігрових двигунах та навігаційних системах.

Третя перевага – це простота та чисельна стійкість інтерполяції. У комп'ютерній графіці та анімації часто потрібно плавно перевести об'єкт з однієї орієнтації в іншу. Для кутів Ейлера лінійна інтерполяція кожного кута окремо дає неприродні траєкторії, оскільки обертання не розподіляється рівномірно вздовж найкоротшого шляху. Кватерніони дозволяють застосовувати метод

сферичної лінійної інтерполяції, який забезпечує рівномірний рух по дузі великого кола на сфері, що візуально виглядає як найбільш природне обертання. При цьому швидкість обертання залишається сталою, а орієнтація змінюється передбачувано.

Четверта перевага – це однозначність та відсутність необхідності в спеціальних угодах. Кути Ейлера чутливі до порядку застосування, наприклад, ZYX або XYZ та до вибору нерухомих або рухомих осей. Кватерніон задає обертання інваріантно: він визначає вісь та кут без будь-якої довільної послідовності. Це спрощує обмін даними між різними системами – навігаційним обладнанням, симуляторами, роботами.

П'ята перевага – це легкість нормування. Внаслідок обчислювальних помилок кватерніон може перестати бути одиничним, що спотворює обертання. Проте відновити одиничну норму дуже просто — достатньо поділити всі чотири компоненти на поточний модуль. Для матриці повороту процедура ортонормування є значно складнішою та обчислювально важчою.

Таким чином, хоча кути Ейлера залишаються зручними для інтуїтивного задання початкової орієнтації, для всіх подальших обчислень – композиції обертань, інтерполяції, чисельного інтегрування та особливо для реального часу – кватерніони є незамінним інструментом. Вони поєднують математичну строгість, обчислювальну ефективність та позбавлені фундаментальних вад, властивих кутам Ейлера, що робить їх стандартом де-факто в сучасній робототехніці, авіаційній навігації, комп'ютерних іграх та анімації персонажів.

3 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ГІРОСТАБІЛІЗОВАНОЮ ПЛАТФОРМОЮ

3.1 Архітектура модуля керування

Апаратна система побудована як єдиний комплекс, що складається з двох окремих, але тісно пов'язаних між собою електронних плат. Ці дві плати мають чітке функціональне розділення – перша це плата керування, друга – плата гіростабілізації. Такий дуалізм дозволяє розподілити навантаження між пристроями та уникнути ситуації, коли одна плата не справляється з одночасним опитуванням датчиків, обробкою сигналів і керуванням двигунами підвісу.

На кресленні (Див. Додаток А, ІАЛЦ.468300.005 Е4) показано розташування електронних компонентів на друкованій платі модуля керування гіростабілізованою платформою камери FPV дрона. Відображено місця встановлення мікроконтролера STM32F303CCT6, інерціального датчика BNO055, стабілізатора живлення, кварцових резонаторів, елементів обв'язки, інтерфейсних роз'ємів та силових ланцюгів живлення сервоприводів. Розміщення компонентів виконано з урахуванням мінімізації довжини сигнальних провідників, зниження рівня електромагнітних завад та забезпечення зручності монтажу. Габаритні розміри друкованої плати становлять 70×30 мм.

На кресленні (Див.Додаток А, ІАЛЦ.468300.006 Е3) наведена схема з'єднань плати. Основою пристрою є мікроконтролер STM32F303CCT6, який виконує обробку інформації та формування керуючих сигналів. Для визначення просторової орієнтації використовується інерціальний датчик BNO055. Схема містить вузол живлення, інтерфейс RS-485 для обміну даними між платами, схему тактування на зовнішньому кварцовому резонаторі, роз'єм програмування, а також виходи керування сервоприводами платформи. Наведені електричні з'єднання забезпечують взаємодію всіх функціональних вузлів пристрою та реалізацію алгоритмів стабілізації камери.

Обидві плати – і керування, і гіростабілізації – побудовані на базі мікроконтролера STM32F303CCT6. Він належить до популярного сімейства

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						34
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

STM32F3, яке славиться відмінною аналоговою периферією та великою кількістю швидкісних каналів. У складі цього мікроконтролера є математичний співпроцесор з плаваючою комою, що дозволяє виконувати тригонометричні обчислення, необхідні для перерахунку кутів, буквально за кілька тактів. STM32F303CCT6 має вдосконалену систему ШІМ-таймерів, які генерують сигнали для сервоприводів з мікросекундною точністю – це саме те, що потрібно для керування MG90S. Крім того, на борту цього контролера є апаратна підтримка інтерфейсів UART, I²C, SPI та RS-485, що робить його універсальним рішенням.

Для визначення просторової орієнтації системи та кутового положення її окремих вузлів кожна плата оснащена сучасним датчиком BNO055. Тут варто зробити невеликий відступ. Звичайні гіроскопи та акселерометри видають сирі дані, які потім доводиться фільтрувати, наприклад, за допомогою фільтра Маджвіка або фільтра Калмана, що забирає багато машинного часу та ресурсів мікроконтролера. BNO055 вирізняється тим, що всередині нього вже є власний 32-розрядний процесор, який виконує злиття даних з акселерометра, гіроскопа та магнітометра апаратно. В результаті мікроконтролер STM32F303CCT6 отримує від BNO055 вже готові кути Ейлера такі як крен, тангаж, рискання або кватерніони. Це не просто зручно — це звільняє основний процесор для вирішення головного завдання: формування керуючих сигналів для сервоприводів з мінімальною затримкою.

Наявність двох незалежних датчиків дає системі майже магічну здатність: вона знає, як нахилився корпусу дрона в просторі, і одночасно знає, в якому положенні перебуває підвіс із камерою. Це дозволяє реалізувати передові алгоритми компенсації.

Тепер детальніше про зв'язок між платами. Для обміну даними використано промисловий інтерфейс RS-485. Тому що RS-485, завдяки диференціальному способу передачі сигналу, має високу стійкість до синфазних завад. Це критично важливо для роботи в безпосередній близькості від потужних двигунів дрона, регуляторів швидкості та відеопередавача, які створюють сильні

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						35
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

електромагнітні перешкоди. Більше того, RS-485 дозволяє прокладати лінію зв'язку завдовжки до кількох десятків метрів без погіршення якості сигналу, що дає змогу фізично рознести плати при необхідності.

Живлення всієї системи здійснюється від зовнішнього блока живлення напругою 5 В. Плата гіростабілізації виконує безпосереднє зчитування даних з датчика BNO055, обробку інформації про орієнтацію та формування команд для компенсації кутових відхилень платформи. Плата керування забезпечує координацію роботи системи, прийом та передачу службових даних, а також обмін інформацією з платою гіростабілізації через інтерфейс RS-485.

Основною метою системи є забезпечення стабілізації положення камери FPV-дрона шляхом безперервного контролю її просторової орієнтації та компенсації небажаних рухів літального апарата та керування платформою. Використання двох незалежних датчиків BNO055 дозволяє отримувати актуальні дані про положення окремих вузлів системи, підвищуючи точність визначення кутів та ефективність роботи алгоритмів стабілізації. Така архітектура забезпечує високу швидкодію, надійність та точність роботи гіростабілізованої платформи в умовах динамічних польотів FPV-дрона.

3.2 Алгоритм зчитування даних з гіроскопа

Основною функцією гіроскопічного модуля є визначення просторової орієнтації гіростабілізованої платформи в реальному часі. Для цього в системі використовується інтелектуальний MEMS-датчик BNO055, який виконує обробку даних від вбудованих акселерометра, гіроскопа та магнітометра і формує готові дані про орієнтацію у вигляді кватерніонів.

Зчитування даних здійснюється мікроконтролером STM32. Робота алгоритму побудована у вигляді послідовності станів, що забезпечує контроль готовності датчика та коректне отримання інформації про поточну орієнтацію.

На початковому етапі виконується перевірка стану датчика. Для цього мікроконтролер надсилає команду запиту статусу переривань. Після отримання

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		36

відповіді перевіряється наявність нового набору даних. Якщо нові дані відсутні, алгоритм повертається до початку циклу та повторює опитування датчика.

У випадку готовності нового вимірювання формується команда на зчитування кватерніонів. Датчик передає чотири компоненти кватерніона: w , x , y та z , які описують поточну орієнтацію об'єкта у тривимірному просторі. Отримані значення зберігаються у відповідній структурі даних типу Quaternion.

Після прийому даних виконується математична обробка кватерніона. На цьому етапі здійснюється перетворення координат відповідно до прийнятої системи відліку та обчислення кутів орієнтації платформи. Для цього використовується функція перетворення кватерніонів у кути Ейлера, що дозволяє отримати значення крену, тангажу та ролу.

Під час першого запуску системи зберігається початковий кватерніон, який використовується як базова орієнтація платформи. Подальші вимірювання порівнюються з цим значенням, що дозволяє визначати відхилення платформи від початкового положення та формувати керуючі сигнали для сервоприводів.

Отримані кути орієнтації передаються до алгоритму стабілізації, де розраховується необхідна компенсація руху. На основі цих розрахунків генеруються сигнали широтно-імпульсної модуляції для керування сервоприводами, які повертають платформу в задане положення.

Таким чином, алгоритм зчитування даних з гіроскопа забезпечує безперервне отримання інформації про просторову орієнтацію платформи, її математичну обробку та передачу результатів до системи стабілізації, що є основою роботи гіростабілізованої платформи камери FPV-дрона.

3.3 Обчислення кутів орієнтації

Для керування гіростабілізованою платформою необхідно безперервно визначати її поточне положення у просторі. У розробленій системі джерелом інформації про орієнтацію є датчик BNO055, який виконує об'єднання даних акселерометра, гіроскопа та магнітометра і формує результат у вигляді

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						37
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

кватерніонів. Такий підхід дозволяє отримувати точну інформацію про просторове положення об'єкта без необхідності виконання складних обчислень фільтрації безпосередньо на мікроконтролері. Після зчитування компонентів кватерніона виконується їх подальша математична обробка з метою визначення кутів орієнтації платформи.

Кватерніон являє собою математичну структуру, що складається з чотирьох компонентів: скалярної частини та трьох векторних складових. Таке представлення орієнтації є більш зручним порівняно з матрицями повороту або безпосереднім використанням кутів Ейлера, оскільки дозволяє уникнути накопичення числових похибок і виключає виникнення ефекту складання рамок під час виконання складних просторових обертань.

Отримані від датчика значення кватерніона перетворюються у кути Ейлера, які використовуються для подальшого керування сервоприводами платформи. У результаті обчислюються три основні кути орієнтації: крен, який характеризує поворот навколо поздовжньої осі, тангаж, що описує поворот навколо поперечної осі, та рискання, яке визначає поворот навколо вертикальної осі. Саме ці параметри дозволяють оцінити відхилення платформи від заданого положення та сформувати відповідні компенсуючі сигнали.

(Див. Додаток А, ІАЛЦ.468300.008 Д2) На кресленні представлено алгоритм процедури отримання та обробки даних орієнтації від інерціального датчика. На початковому етапі здійснюється зчитування даних з гіроскопічного модуля та перевірка коректності їх отримання. Після успішного приймання даних формується кватерніон, який використовується для подальших обчислень орієнтації. За необхідності виконується процедура калібрування із збереженням базової орієнтації системи. У робочому режимі визначається різниця між поточною та базовою орієнтацією, після чого здійснюється перетворення кватерніонів у кути Ейлера. На основі отриманих значень формуються сигнали керування та передаються команди на виконавчі механізми гіростабілізованої платформи.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						38
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Обчислення кутів виконується циклічно після кожного отримання нового пакета даних від датчика. Спочатку проводиться нормалізація отриманих значень кватерніона, після чого за допомогою тригонометричних функцій визначаються значення кутів орієнтації. Отримані результати можуть бути представлені як у радіанах, так і в градусах залежно від вимог програмного забезпечення. У даній системі для зручності налаштування та аналізу використовуються значення у градусах.

Визначені кути орієнтації надходять до алгоритму стабілізації, який розраховує величину компенсації для кожної осі платформи. На основі цих даних формуються сигнали керування сервоприводами, що забезпечують утримання камери у стабільному положенні незалежно від нахилів та вібрацій безпілотного літального апарата. Завдяки високій швидкості обробки даних та використанню кватерніонного представлення орієнтації система здатна оперативно реагувати на зміну положення дрона та підтримувати плавну і точну стабілізацію камери під час польоту.

3.4 Використання кватерніонів для опису орієнтації

У розробленому модулі керування гіростабілізованою платформою для визначення просторового положення камери використовуються кватерніони, які формуються безпосередньо датчиком BNO055. Вибір такого способу представлення орієнтації обумовлений необхідністю отримання точних даних про положення платформи під час польоту FPV-дрона та забезпечення стабільної роботи системи незалежно від складності виконуваних маневрів.

У програмному забезпеченні мікроконтролера STM32F303CCT6 датчик BNO055 працює у режимі NDOF, у якому виконується апаратне об'єднання даних акселерометра, гіроскопа та магнітометра. У результаті датчик формує готовий кватерніон, що описує поточну орієнтацію платформи у просторі. Після отримання відповіді від датчика зчитуються чотири складові кватерніона:

Qua_w, Qua_x, Qua_y та Qua_z. Отримані значення записуються у структуру Quaternion та використовуються для подальших обчислень.

На відміну від безпосереднього використання кутів Ейлера, кватерніони дозволяють уникнути проблеми складання рамок, яка може виникати при великих кутах нахилу дрона. Це особливо важливо для FPV-польотів, де безпілотний літальний апарат може виконувати різкі маневри та швидкі зміни орієнтації. Використання кватерніонів забезпечує коректний опис положення платформи в усьому робочому діапазоні кутів без втрати ступенів свободи.

Після зчитування даних виконується перетворення отриманого кватерніона у внутрішнє представлення орієнтації. Під час першого запуску системи поточний кватерніон зберігається як базове положення платформи. Надалі кожен новий вимір порівнюється з цим еталонним положенням, що дозволяє визначати відхилення платформи від початкової орієнтації. Для цього у програмі використовується операція множення кватерніонів та обчислення відносного повороту між поточним і базовим положенням.

Використання кватерніонів також дозволяє зменшити обсяг математичних обчислень під час обробки даних орієнтації. Оскільки основні алгоритми фільтрації виконуються всередині датчика BNO055, мікроконтролер отримує вже готовий результат та виконує лише перетворення кватерніонів у кути, необхідні для керування сервоприводами. Це знижує навантаження на процесор та підвищує швидкодію всієї системи керування.

Таким чином, у розробленому проєкті кватерніони є основним способом представлення орієнтації гіростабілізованої платформи. Їх використання забезпечує високу точність визначення просторового положення камери, усуває проблеми, пов'язані з використанням кутів Ейлера, та створює основу для стабільної роботи алгоритму компенсації рухів FPV-дрона.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						40
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

3.5 Обчислення орієнтації на основі кватерніонів

У розробленому модулі керування гіростабілізованою платформою обчислення орієнтації виконується на основі кватерніонів, які надходять від датчика BNO055. Датчик працює в режимі NDOF та формує готовий кватерніон, що описує поточне положення платформи у просторі. Такий підхід дозволяє отримувати точну інформацію про орієнтацію без необхідності виконання складних алгоритмів об'єднання даних безпосередньо на мікроконтролері STM32F303CCT6.

Після отримання чергового пакета даних програмне забезпечення зчитує значення компонентів кватерніона та формує структуру Quaternion. На початку роботи системи за командою калібрування поточний кватерніон зберігається як базове положення платформи. Це положення використовується як початкова точка відліку, відносно якої надалі визначаються всі зміни орієнтації.

Для обчислення поточного відхилення платформи використовується операція множення кватерніонів. Спочатку визначається обернений кватерніон для базового положення, після чого він множиться на поточний кватерніон, отриманий від датчика. У результаті формується відносний кватерніон, який описує різницю між поточним та початковим положенням платформи. Саме цей кватерніон використовується для подальшого визначення кутів відхилення.

Використання такого підходу дозволяє виконувати обчислення орієнтації незалежно від абсолютного положення датчика та враховувати лише фактичні зміни положення платформи відносно початково встановленого напрямку. Це особливо важливо для систем стабілізації, оскільки сервоприводи повинні компенсувати саме відхилення від заданого положення, а не абсолютну орієнтацію у просторі.

Після визначення відносного кватерніона виконується його перетворення у кути орієнтації. Отримані значення крену та тангажу використовуються алгоритмом стабілізації для формування керуючих сигналів сервоприводам.

Завдяки використанню кватерніонів обчислення залишаються стабільними навіть при значних кутах нахилу платформи та різких маневрах дрона.

Важливою перевагою такого методу є відсутність накопичення похибок та проблеми складання рамок, яка характерна для систем, що працюють виключно з кутами Ейлера. Крім того, обчислення на основі кватерніонів дозволяють плавно та безперервно відстежувати зміну орієнтації платформи, що позитивно впливає на якість стабілізації камери та зменшує ривки під час роботи сервоприводів.

Таким чином, у розробленому проєкті обчислення орієнтації базується на використанні базового та поточного кватерніонів, між якими визначається відносний поворот. Отримані результати використовуються для розрахунку кутів відхилення та подальшого керування виконавчими механізмами гіростабілізованої платформи FPV-дрона.

3.6 Перетворення кватерніонів у кути для керування сервоприводами

У розробленому модулі керування гіростабілізованою платформою основна інформація про орієнтацію надходить від датчика BNO055 у вигляді кватерніонів. Такий спосіб представлення є найбільш зручним для математичної обробки, проте безпосередньо використовувати кватерніони для керування сервоприводами недоцільно. Для формування керуючих сигналів необхідно отримати зрозумілі фізичні параметри, які характеризують відхилення платформи по кожній осі. Тому після обчислення відносної орієнтації виконується перетворення кватерніонів у кути Ейлера.

Після зчитування поточного кватерніона та визначення відносного повороту відносно базового положення програмне забезпечення виконує математичне перетворення, у результаті якого обчислюються кути крену, тангажу та ристання. Отримані значення характеризують поточне відхилення платформи від початково встановленого положення та використовуються для подальшого формування команд керування.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						42
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

У даному проєкті для стабілізації камери використовуються лише кути крену та тангажу, оскільки саме ці осі компенсуються сервоприводами гіростабілізованої платформи. Кут рискання може використовуватися для моніторингу орієнтації, проте безпосередньо в алгоритмі керування сервоприводами участі не бере. Після виконання перетворення отримані кути переводяться у градуси та масштабуються відповідно до робочого діапазону сервоприводів.

Подальша обробка полягає у визначенні величини відхилення від нульового положення. Для кожної осі обчислюється необхідний кут компенсації, який має забезпечити повернення камери у стабільне положення незалежно від нахилу або вібрацій безпілотного літального апарата. Розраховані значення використовуються для зміни коефіцієнта заповнення сигналу широтно-імпульсної модуляції, який генерується апаратними таймерами мікроконтролера STM32F303CCT6.

Використання кутів Ейлера на завершальному етапі обробки значно спрощує реалізацію алгоритму керування сервоприводами. Незважаючи на те, що всі обчислення орієнтації виконуються за допомогою кватерніонів, саме кути крену та тангажу є найбільш зручними для безпосереднього зв'язку між системою визначення положення та виконавчими механізмами платформи.

Таким чином, у розробленій системі перетворення кватерніонів у кути Ейлера є проміжним етапом між алгоритмом визначення орієнтації та системою керування сервоприводами. Отримані кути відображають фактичне відхилення платформи від початкового положення та використовуються для формування компенсаційних керуючих сигналів, які забезпечують стабільне положення камери під час польоту FPV-дрона.

3.7 Генерація PWM сигналів для сервоприводів

Одним із ключових етапів роботи гіростабілізованої платформи є формування сигналів керування сервоприводами, які забезпечують компенсацію

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		43

нахилів та вібрацій безпілотного літального апарата. У розробленому модулі керування ця задача реалізована за допомогою генерації сигналів широтно-імпульсної модуляції (PWM), що формуються апаратними таймерами мікроконтролера STM32F303CCT6.

Після обчислення кутів орієнтації на основі даних, отриманих від датчика BNO055, програмне забезпечення визначає величину відхилення платформи від початкового положення. Відповідно до отриманих значень крену та тангажу розраховується необхідне положення кожного сервопривода. Результатом цих обчислень є значення, які визначають тривалість керуючого імпульсу для кожного каналу керування.

Для формування PWM-сигналів використовуються апаратні таймери мікроконтролера, які працюють від зовнішнього кварцового резонатора. Використання зовнішнього кварцу забезпечує високу точність тактової частоти та стабільність часових інтервалів, що є важливим фактором для коректної роботи сервоприводів. Завдяки цьому досягається плавне переміщення платформи та зменшуються небажані коливання виконавчих механізмів.

У процесі роботи системи значення кутів орієнтації безперервно оновлюються, після чого виконується перерахунок параметрів PWM-сигналів. При зміні положення дрона ширина імпульсу автоматично коригується таким чином, щоб сервоприводи переміщували платформу у напрямку, протилежному до виявленого відхилення. Це дозволяє компенсувати рухи літального апарата та утримувати камеру у стабільному положенні.

Генерація сигналів здійснюється апаратними засобами мікроконтролера, що дозволяє мінімізувати навантаження на центральне ядро та забезпечити високу точність часових параметрів. Частота оновлення PWM-сигналів достатньо висока для швидкої реакції сервоприводів на зміну орієнтації платформи, що позитивно впливає на якість стабілізації зображення під час польоту.

У розробленому проєкті PWM-сигнали є завершальним етапом ланцюга обробки даних. Починаючи від зчитування кватерніонів датчиком BNO055,

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						44
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

подальшого обчислення орієнтації та визначення кутів відхилення, система формує керуючі імпульси для сервоприводів, які виконують фізичне переміщення платформи. Завдяки цьому забезпечується ефективна компенсація рухів дрона та стабільне положення камери під час виконання польотних завдань.

На кресленні (Див. Додаток А, ІАЛЦ.468300.007 Д1) наведено загальний алгоритм роботи модуля керування гіростабілізованою платформою камери FPV дрона. Після запуску системи виконується її ініціалізація та перевірка готовності до роботи. У разі виявлення несправності здійснюється перехід до режиму обробки помилки. Після успішного завершення перевірки система переходить до приймання команд керування, виконує необхідні дії з переміщення платформи та контролює факт виконання отриманої команди. Після завершення операції платформа повертається у початкове положення, після чого робота алгоритму завершується. Схема відображає основну послідовність функціонування розробленого пристрою.

3.8 Тестування та аналіз роботи системи

Після завершення розробки апаратної та програмної частин модуля керування було проведено комплексне тестування системи. Метою тестування було підтвердження працездатності гіростабілізованої платформи, перевірка правильності зчитування даних з датчиків, коректності обчислення орієнтації та оцінка якості стабілізації камери під час зміни положення платформи.

Тестування виконувалося на двоплатній системі, що складається з плати керування та плати гіростабілізації. Обидві плати обладнані датчиками BNO055 та з'єднані між собою інтерфейсом RS-485. Живлення системи здійснювалося від блока живлення напруги 5 В. Центральним елементом керування є мікроконтролер STM32F303CCT6, який виконує обробку даних орієнтації та формує PWM-сигнали для сервоприводів.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		45

На першому етапі перевірялася коректність роботи датчика BNO055 у режимі NDOF. Було підтверджено стабільне зчитування кватерніонів, відсутність втрати пакетів та правильність формування структури Quaternion у програмі. Після запуску системи та виконання калібрування датчик формував стабільні значення орієнтації, які змінювалися відповідно до реальних поворотів платформи.

Наступним етапом було тестування алгоритму обчислення орієнтації. Перевірялося збереження базового кватерніона, обчислення відносного повороту та перетворення кватерніонів у кути крену і тангажу. Результати показали, що система коректно визначає відхилення платформи від початкового положення та не втрачає точність при значних кутах нахилу.

Окремо оцінювалася робота генерації PWM-сигналів. За допомогою осцилографа та візуального контролю сервоприводів було підтверджено стабільність періоду та ширини імпульсів. Використання зовнішнього кварцового резонатора забезпечило високу точність таймерів мікроконтролера, що позитивно вплинуло на плавність руху сервоприводів і зменшило ривки під час стабілізації.

Під час тривалого тестування перевірялася стабільність роботи системи. Було встановлено, що зв'язок між платами через RS-485 залишається стійким, збої передачі даних не спостерігалися, а мікроконтролер коректно обробляє потік інформації від датчиків у реальному часі. Також не було виявлено помітного дрейфу орієнтації після виконання початкового калібрування.

Аналіз результатів тестування показав, що розроблений модуль керування забезпечує коректне зчитування даних з датчиків, стабільне обчислення орієнтації на основі кватерніонів та надійну генерацію PWM-сигналів для сервоприводів. Система демонструє достатню швидкодію та точність для задач стабілізації камери FPV-дрона, а використання кватерніонного представлення орієнтації дозволяє уникнути проблем, характерних для систем на основі кутів Ейлера.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		46

Отримані результати підтверджують працездатність розробленого проекту та його придатність для використання у складі гіростабілізованої платформи камери безпілотного літального апарата.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проєкту було розроблено модуль керування гіростабілізованою платформою камери FPV дрона, призначений для компенсації кутових переміщень та вібрацій безпілотного літального апарата під час польоту. Використання гіростабілізованої платформи дозволяє значно зменшити вплив нахилів, прискорень та вібрацій літального апарата на якість отриманого зображення.

У процесі виконання роботи було проведено аналіз особливостей стабілізації камер у FPV-дронах, розглянуто існуючі конструкції гіростабілізованих платформ та досліджено сучасні методи визначення орієнтації у просторі. Особливу увагу було приділено використанню MEMS-датчиків, які завдяки своїм компактним розмірам, низькому енергоспоживанню та високій точності набули широкого поширення у системах керування безпілотними літальними апаратами. За результатами проведеного аналізу було обрано підхід, заснований на використанні датчиків BNO055, які дозволяють отримувати готові дані про орієнтацію об'єкта без необхідності реалізації складних алгоритмів фільтрації на мікроконтролері.

У ході виконання дипломного проєкту було розроблено апаратну архітектуру системи, яка складається з двох взаємопов'язаних плат: плати керування та плати гіростабілізації. В основі обох плат використано датчики BNO055, а центральним елементом системи є мікроконтролер STM32F303CCT6. Для забезпечення обміну даними між платами використано інтерфейс RS-485, який відзначається високою завадостійкістю та надійністю передачі інформації. Живлення системи здійснюється від блока живлення напруги 5 В, що забезпечує сумісність з більшістю бортових систем безпілотних літальних апаратів.

Важливим етапом роботи стало створення програмного забезпечення для обробки даних орієнтації та керування виконавчими механізмами платформи. Було реалізовано алгоритм зчитування даних із датчиків, формування структур кватерніонів, визначення базового положення платформи та обчислення

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						48
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

поточного відхилення відносно початкової орієнтації. Для опису просторового положення використано кватерніонне представлення, що дозволило уникнути проблеми складання рамок та забезпечити стабільність математичних обчислень у всьому діапазоні робочих кутів. На основі отриманих кватерніонів виконувалося обчислення кутів орієнтації, які надалі використовувалися для формування керуючих сигналів сервоприводам.

Окрему увагу під час розробки було приділено підвищенню точності роботи системи. Для цього програмно виконано переведення мікроконтролера на зовнішній кварцовий резонатор, що дозволило забезпечити стабільну роботу таймерів та підвищити точність формування PWM-сигналів. Завдяки цьому вдалося покращити плавність роботи сервоприводів та зменшити вплив часових похибок на процес стабілізації платформи.

Під час проведення експериментальних випробувань встановлено, що розроблена система забезпечує достатню швидкодію для роботи в реальному часі та дозволяє оперативно реагувати на зміни положення безпілотного літального апарата. Використання кватерніонного представлення орієнтації забезпечує стабільність роботи алгоритму навіть при значних кутах нахилу, а застосування апаратних засобів формування PWM-сигналів дозволяє досягти плавної роботи сервоприводів та підвищити якість стабілізації.

Отримані результати свідчать про те, що поставлена мета дипломного проєкту повністю досягнута. Усі завдання, визначені на початковому етапі роботи, виконані в повному обсязі. Розроблений модуль керування успішно реалізує функції визначення орієнтації, обробки даних датчиків та стабілізації положення камери.

Практична цінність проєкту полягає у можливості використання розробленого рішення у складі FPV-дронів різного призначення, а також його подальшої модернізації та інтеграції у більш складні системи стабілізації та керування безпілотними літальними апаратами.

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		49

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chen, Y. H., Chao, H. Y., & Chen, Y. C. Camera Gimbal Control from UAV Autopilot Target Tracking. International Journal of Automation and Smart Technology, 2015. Available at: https://www.researchgate.net/publication/282712738_Camera_gimbal_control_from_UAV_autopilot_target_tracking
2. Svjataha, M. A Gimbal Stabilizer. KTH Royal Institute of Technology, 2019. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A1373766/FULLTEXT01.pdf>
3. Kolo. Everything You Wanted to Know About FPV Drones. 2024. Available at: <https://koloua.com/news/vse-shcho-vi-khotili-znati-pro-fpv-droni-kamikadze-10>
4. Modelistam. How Is a Drone Different from a Regular Radio-Controlled Model: Main Differences. Available at: <https://modelistam.com.ua/ua/chem-dron-otlichaetsya-obychnogo-kratko-glavnyh-otlichyah-a-324/>
5. BlueBird Tech. What Is an FPV Drone? Available at: <https://www.blue-bird.tech/news/shho-take-fpv-dron/>
6. PansionU. FPV Drone: Innovations and First-Person Control Capabilities. Available at: <https://pansionu.com.ua/ua/fpv-dron-innovaczii-i-vozmozhnosti-upravleniya-s-pervogo-licza>
7. MegaDron. What Is an FPV Drone? Everything You Need to Know. Available at: <https://megadron.pl/uk/blog/shcho-take-fpv-dron-vse-shcho-vam-potribno-znaty-1750940127.html>
8. BlueBird Tech. Flight Stabilization Systems and Flight Controllers for Drones. Available at: <https://www.blue-bird.tech/news/sistemi-stabilizacziyi-polotu-droniv-ta-polotni-kontroleri/>
9. BlueBird Tech. Flight Stabilization Systems and Flight Controllers for Drones. Available at: <https://www.blue-bird.tech/news/sistemi-stabilizacziyi-polotu-droniv-ta-polotni-kontroleri/>
10. Analog Devices. MEMS Gyroscope Principles and Applications. Available at: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/mems-gyroscopes.html>
11. Bosch Sensortec GmbH. BNO055 Intelligent 9-axis Absolute Orientation Sensor Datasheet. 2021. Available at: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bno055-ds000.pdf>
12. STMicroelectronics. STM32F303xB STM32F303xC Advanced ARM-Based 32-bit MCUs Datasheet. 2022. Available at: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f303cb.pdf>

					ІАЛЦ. 468300.004 ПЗ	Арк.
						50
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

13. STMicroelectronics. STM32F303xB/C, STM32F328x8, STM32F358xC, STM32F398xE Advanced ARM-Based MCUs Reference Manual RM0316. 2023. Available at: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0316-stm32f303xbcd-stm32f303x68-stm32f328x8-stm32f358xc-stm32f398xe-advanced-armbased-mcus-stmicroelectronics.pdf
14. Kuipers, J. B. Quaternion and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality. Princeton University Press, 1999. Available at: <https://press.princeton.edu/books/hardcover/9780691102986/quaternions-and-rotation-sequences>
15. Diebel, J. Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors. Stanford University, 2006. Available at: <https://ai.stanford.edu/~diebel/attitude.html>