

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший(бакалаврський)
Система бездротового керування рухомим об'єктом
на базі мікроконтролера STM32
(тема)

Виконав:
здобувач IV року навчання,
групи КІУКІ-21-9
Андрій ОМЕЛЬЧЕНКО
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. АПОТ Дарія РАХЛІС
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри _____
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ Автоматизації проектування обчислювальної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 123 Комп'ютерна інженерія _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма _____ Комп'ютерна інженерія _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 25 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Омельченко Андрію Вікторовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Система бездротового керування рухомим об'єктом на базі
мікроконтролера STM32 _____

затверджена наказом університету від “ 21 ” _____ травня _____ 2025 р. № 403Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 12 _____ червня _____ 2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи _____

1. Взаємодія сенсорів та актуаторів. _____

2. Лінійка мікроконтролера – STM32F1. _____

3. Тип сенсорів – MEMS. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1. Вступ. _____

2. Визначення апаратної та програмної бази. _____

3. Розробка схеми підключення. _____

4. Тестування працездатності. _____

5. Висновки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____
12 слайдів


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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів	Примітка
1.	Визначення теми роботи	06.05.2025	виконано
2.	Аналіз літературних джерел	06.05.2025 – 10.05.2025	виконано
3.	Опис принципу роботи	11.05.2025 – 13.05.2025	виконано
4.	Вибір апаратної бази	14.05.2025 – 15.05.2025	виконано
5.	Проектування схем підключення	16.05.2025 – 21.05.2025	виконано
6.	Відлагодження мікроконтролера	22.05.2025 – 24.05.2025	виконано
7.	Тестування зібраної системи	25.05.2025	виконано
8.	Оформлення пояснювальної записки	26.05.202 – 05.06.2025	виконано
9.	Захист кваліфікаційної роботи	12.06.2025	

Дата видачі завдання 06 травня 2025 р.

Здобувач 
(підпис)

Керівник роботи


(підпис)

доц. каф. АПОТ Дарія РАХЛІС
(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 60 с., 37 рис., 1 табл., 3 дод., 11 джерел.

СИСТЕМА БЕЗДРОТОВОГО КЕРУВАННЯ, АКСЕЛЕРОМЕТР, ГІРОСКОП, БАРОМЕТР, МЕМС-ДАТЧИКИ, МІКРОКОНТРОЛЕР, РАДІОКЕРУВАННЯ, ЕЛЕКТРОДВИГУНИ, АКУМУЛЯТОРИ.

Метою кваліфікаційної роботи є огляд будови пристрою для визначення і керування положенням тіла у просторі та розробка такої системи, аналіз її роботи а також поєднання компонентів в єдину систему з можливістю подальшої її модернізації.

У результаті роботи розроблено програмно-апаратний модуль, який забезпечує реагування актуаторами на дані, отримані від сенсорів руху. Були застосовані методи вирішення задач, які є повторенням курсу дисципліни «Комп'ютерні системи», «Спеціалізовані мікроконтролерні системи», «Комп'ютерна електроніка», вивчено інформацію про розробку систем стабілізації на основі колекторних та безколекторних двигунів а також використовувані у них обчислювальні потужності.

ABSTRACT

Course project: 60 pages, 37 figures, 1 tables, 3 appendices, 11 sources.

ACCELEROMETER, GYROSCOPE, BAROMETER, MEMS-SENSORS
ALGORITHM, STMICROELECTRONICS, POSITION IN SPACE,
ACCELERATION, RADIO CONTROL, ELECTRIC MOTORS, BATTERIES,
CURRENT.

The purpose of the qualification work is to review the structure of the device for determining and controlling the position of the body in space and the development of such a system, analysis of its operation, as well as the combination of components into a single system with the possibility of its further modernization.

As a result of the work, a software and hardware module was developed that ensures the response of actuators to data received from motion sensors. Methods for solving problems were applied, which are a repetition of the course of the discipline "Computer Systems", "Specialized Microcontroller Systems", "Computer Electronics", information on the development of stabilization systems based on collector and brushless motors, as well as the computing power used in them, was studied.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	10
1.1 Системи бездротового керування рухомим об'єктом	10
1.2 Мікроконтролери як основа для систем керування	11
1.2.1 Мікроконтролери ATMEGA	13
1.2.2 Мікроконтролери STM	14
1.3 Мікроелектромеханічні системи у системах керування	18
1.3.1 Акселерометр	20
1.3.2 Гіроскоп	20
1.3.3 Барометр	22
1.4 Обмін даними між МЕМС-пристроями	23
1.5 Виконавчі елементи систем керування	28
1.5.1 Електромотори	28
1.5.2 Стабілізація за допомогою пропелерів	30
1.6 Огляд існуючих рішень	31
1.7 Мета та постановка задачі	36
2 МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМИМ ОБ'ЄКТОМ	37
2.1 Вибір компонентів та схема прототипу системи бездротового керування	38
2.2 Автономність системи керування	45
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОТОТИПУ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ	48
3.1 Прототип системи бездротового керування	48
3.2 Програму забезпечення та його налаштування	49
3.3 Тестування коректності роботи прототипа	55
ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	60
ДОДАТОК А	61
ДОДАТОК Б	63
ДОДАТОК В	69

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ADC (АЦП) – аналого-цифровий перетворювач.

ARM (Advanced RISC Machine) – поліпшені RISC процесори.

AVR – Alf and Vegard's RISC процесори.

CAN (Controller Area Network) – мережа контролерів.

DAC (ЦАП) – цифро-аналоговий перетворювач.

DSP – процесор цифрової обробки сигналів.

FPU – математичний модуль операцій з рухомою комою.

GPS – система глобального позиціонування.

I2C (Inter-Integrated Circuit) – послідовний асиметричний інтерфейс для двонаправленої передачі даних між інтегрованими схемами.

IBUS – цифровий протокол передачі даних від компанії FlySky.

LCD-TFT – рідкокристалічний дисплей в якому кожен піксель контролюється від одного до чотирьох транзисторів.

NVIC (Nested Vectored Interrupt Controller) – вкладений векторний контролер переривань.

PID (proportional–integral–derivative) – алгоритм функціонування регулятора, що враховує відхилення, його інтеграл та похідну.

RTOS – операційна система реального часу

SBUS – цифровий протокол передачі даних на основі UART.

SPI (Serial Peripheral Interface) – послідовний периферійний інтерфейс.

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) – універсальний асинхронний приймач-передавач.

MEMS – мікроелектромеханічні системи.

OS – операційна система.

СРЧ – система реального часу

ШИМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

У нинішніх умовах динамічного розвитку технологій мікроконтролерні системи займають все важливіше місце в інженерії та прикладних сферах. Вони активно впроваджуються у промислові процеси, медичне обладнання, автомобільні системи, а також у широкий спектр побутових приладів. Завдяки своїм універсальним можливостям і здатності до точного контролю, ці системи відіграють ключову роль у реалізації сучасних технічних рішень, де необхідне точне визначення положення об'єктів у просторі та ефективне управління ними.

Архітектура таких пристроїв відрізняється великою гнучкістю – вона дозволяє поєднувати компоненти з різними характеристиками, вартістю та призначенням, відповідно до вимог конкретного проєкту. Це робить мікроконтролерні системи надзвичайно адаптивними для вирішення складних інженерних задач, як-от відстеження змін положення у тривимірному просторі або збирання даних у важкодоступних місцях. Зростаючий попит на недорогі, компактні та функціональні рішення стимулює подальший розвиток цієї галузі, що призводить до розширення сфер її застосування – від робототехніки до автономних літальних апаратів.

З метою забезпечення стабільності положення об'єкта та можливості його управління, у таких системах широко застосовуються спеціалізовані сенсорні модулі. Вони дають змогу точно визначати положення та орієнтацію пристрою, що відкриває можливості для створення складних автоматизованих систем стабілізації. У випадку, коли об'єкт здатен змінювати своє положення, можливе впровадження алгоритмів автокерування, що підтримують безпечну орієнтацію і знижують ризики, одночасно підвищуючи ефективність роботи.

На практиці вже реалізовано численні проєкти на базі таких систем, однак досі зберігається низка викликів, пов'язаних із підвищенням точності,

швидкодії та надійності у складних умовах експлуатації. Водночас, існують прогалини в інтеграції простих та доступних рішень для побутових і малогабаритних пристроїв, де збереження балансу між ціною та функціональністю є критично важливим.

Основу подібних систем становлять два головні типи сенсорів: акселерометри та гіроскопи. В залежності від умов експлуатації, вони можуть бути доповнені іншими видами датчиків або виконавчими механізмами, що дозволяє значно підвищити точність вимірювання та розширити функціональність пристрою.

Акселерометр призначений для фіксації лінійного прискорення, яке виникає внаслідок дії сил, окрім гравітаційної. Він вимірює компоненти повного прискорення, даючи змогу визначити як абсолютне прискорення, так і орієнтацію відносно вектора гравітації. Такий тип сенсора є широко використовуваним – його можна зустріти як у мобільних телефонах, так і у складних системах стабілізації руху транспортних засобів.

Гіроскоп, натомість, слугує для вимірювання кутової швидкості або зміни орієнтації об'єкта відносно фіксованої системи координат. Його дані є надзвичайно важливими для систем, де необхідно забезпечити точний контроль кута нахилу або повороту, наприклад у безпілотних літальних апаратах або стабілізаційних платформах.

Інтегруючи дані від акселерометра та гіроскопа, можна обчислити не лише положення та напрям руху, а й швидкість та зміну траєкторії об'єкта. У підсумку, ці сенсорні технології відкривають нові горизонти для створення передових рішень у найрізноманітніших галузях науки й техніки.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка апаратно-програмної системи для вимірювання положення об'єкта в просторі з використанням інерціальних сенсорів. Робота ґрунтується на необхідності створення простого, надійного та недорогого рішення для повсякденних задач, які не вимагають професіонального обладнання. У перспективі така система може бути масштабована або доповнена новими модулями.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Системи бездротового керування рухомим об'єктом

Система бездротового керування рухомим об'єктом – це програмно-апаратний механізм, котрий впливає на рух певного об'єкта відповідно до отриманих керуючих сигналів без фізичного кабельного з'єднання.

Наприклад, у якості рухомого об'єкта може бути човен, який течія неспинно рухає по воді. Аби він не сів на мілину його треба відштовхувати від берега та інших перешкод: очерету, каряг, густих куширів – вручну робити це незручно, тому в такому випадку можна встановити систему бездротового керування. Встановивши на човні стерно, до якого підключений електромотор та радіоприймач, напрямком руху човна можна буде керувати за допомогою радіопередавача, передаючи значення необхідного відхилення стерна – це і є система бездротового керування рухомим об'єктом.

Якщо ж об'єкт рухається у повітрі, керувати його рухом можна механізмом подібним до стерна, розташованим на крилах та хвості, які мають бути частиною об'єкта. Але тоді об'єкт має постійно рухатись, інакше – впаде. Коли треба щоб об'єкт міг зависнути у повітрі і не рухатися в жодному напрямку використовують горизонтально розміщені пропелери які при синхронній роботі стабілізують положення корпусу горизонтально відносно землі.

При такому способі корегування руху керується не кожен пропелер, а їх групи: передні-задні, ліві-праві. Напрямки руху називають: тангаж – нахил вліво-вправо, керується швидкість лівих та правих пропелерів; крен – нахил вперед-назад, керуються передні та задні пропелери; ролання – оберт навколо власної вісі – керуються геометрично діагонально протилежні пропелери.

Загальний склад системи бездротового керування об'єктом наступний:

- бездротовий передавач сигналу;
- бездротовий приймач сигналу;
- механізм, впливаючий на рух об'єкта;
- обчислювальний пристрій, що перетворює отриманий керуючий сигнал у роботу керуючого механізму.

Передавати сигнали без дротів можна декількома технологіями і багатьма протоколами, наприклад, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, світлодіодом інфрачервоного випромінювання, голосом та мікрофоном, жестами та відеокамерою, тощо.

Основою систем бездротового керування можуть слугувати різні мікроконтролери. Розглянемо найпопулярніші варіанти.

1.2 Мікроконтролери як основа для систем керування

Мікроконтролер відрізняється від комп'ютерного процесора тим, що включає не лише блок обробки арифметичних операцій, але й оперативну та статичну пам'ять, різноманітні контролери, такі як NVIC, модулі перетворення даних: ADC, DAC, а також апаратні реалізації інтерфейсів передачі даних: SPI, USART, I²C, CAN тощо.

Як атоми лежать в основі всіх речовин, так і фундаментом будь-якого мікроконтролера є транзистори – мікроскопічні електронні ключі, що з'єднані між собою згідно із заздалегідь визначеною схемою. Саме на основі таких зв'язків формується структура мікроконтролера: пам'ять, порти введення-виведення, таймери та інші функціональні блоки являють собою складні композиції транзисторів. Керування мікроконтролером відбувається шляхом подачі електричних сигналів на певні регістри, що дозволяє вмикати або вимикати окремі внутрішні ланцюги. Наприклад, можна активувати конкретний порт у режимі високого імпедансу (Hi-Z) або змінити параметри системного такту, змінивши множник частоти.

На сьогоднішній день ARM-архітектура вважається однією з найбільш продуктивних і водночас економічно вигідних [1]. Вона поєднує високу обчислювальну потужність із низьким енергоспоживанням, що робить її надзвичайно привабливою для більшості сучасних застосувань – від смартфонів до вбудованих систем. Проте навіть попри поширення 32-бітових ARM-процесорів, простіші 8- і 16-бітові мікроконтролери залишаються актуальними. Їхня популярність пояснюється максимально низькою вартістю та здатністю вирішувати нескладні задачі, де не вимагається висока швидкодія або великі обсяги пам'яті.

Мікроконтролери класифікують за кількома основними критеріями:

Тип набору інструкцій:

– CISC (англ. Complex Instruction Set Computing) – архітектура з розширеним набором команд. Вона здебільшого застосовується в процесорах, які виконують складні операції за допомогою однієї інструкції;

– RISC (англ. Reduced Instruction Set Computing) – архітектура з обмеженим і оптимізованим набором команд. Вона ділиться на численні реалізації залежно від конкретного застосування наприклад, ARM, MIPS [2].

Розрядність шин даних:

– 8-бітні – застосовуються у простих системах з невеликими вимогами до продуктивності та пам'яті (наприклад, ATtiny);

– 16-бітні – забезпечують більшу продуктивність та можливості порівняно з 8-бітними, використовуються в більш складних завданнях;

– 32-бітні і більше – найбільш продуктивні мікроконтролери, які використовуються у сучасних вбудованих системах, що вимагають високої обчислювальної потужності (наприклад, STM32) [2].

Завдяки широкому розмаїттю характеристик, мікроконтролери можуть бути адаптовані до виконання багатьох завдань, від управління простими побутовими пристроями до керування складними систем автоматизації.

1.2.1 Мікроконтролери ATMEL

Atmel Corporation (тепер є частиною Microchip Technology) була одним із провідних розробників мікроконтролерів, відомих своєю простотою, ефективністю та універсальністю. Мікроконтролери Atmel знайшли широке застосування завдяки своїй гнучкості, потужній архітектурі та розвинутій екосистемі підтримки.

Основою багатьох мікроконтролерів Atmel є архітектури AVR і ARM, які забезпечують продуктивність і простоту використання для широкого кола завдань.

Основні серії мікроконтролерів Atmel AVR (Alf and Vegard's RISC processor):

- TinyAVR – прості, компактні 8-бітні мікроконтролери з мінімальною кількістю периферійних модулів, для задач із низькими вимогами до ресурсів;

- MegaAVR – універсальні 8-бітні мікроконтролери з більшою продуктивністю та розширеною периферією;

- XMEGA – високопродуктивні 8/16-бітні мікроконтролери з великою кількістю периферійних модулів і покращеними енергозберігаючими функціями.

Мікроконтролери Atmel відзначаються ефективним виконанням інструкцій, що забезпечує високу швидкість роботи при низькому енергоспоживанні.

ATM Підтримують широкий набір периферійних модулів, таких як UART, SPI, I²C, PWM, ADC, DAC, таймери, USB, CAN, Ethernet тощо [3].

Мікроконтролери Atmel мають спеціальні режими енергозбереження, які дозволяють зменшити споживання енергії в стані простою.

Розвинене програмне середовище розробки Atmel Studio для AVR та SAM-контролерів, яке забезпечує зручний інструментарій для програмування, налагодження та моделювання роботи мікроконтролера.

- багато мікроконтролерів Atmel (особливо AVR) використовуються в

платформах Arduino, що робить їх популярними серед початківців і розробників прототипів.

Переваги мікроконтролерів Atmel:

- простота у використанні завдяки підтримці Arduino та зручного середовища розробки;
- висока енергоефективність, особливо у серіях SAM L та TinyAVR які можуть бути заживлені навіть від крихітних сонячних панелей;
- потужна спільнота користувачів і багата база прикладів і документації.

1.2.2 Мікроконтролери STM

Компанія STMicroelectronics є одним із лідерів у розробці та виробництві мікроконтролерів. Вона зіграла ключову роль у популяризації вбудованих систем завдяки широкому асортименту чіпів, що поєднують високу продуктивність, енергоефективність і багату периферію.

Основою більшості мікроконтролерів STM є процесорні ядра сімейства ARM Cortex:

- Cortex-M0/M0+ – найпростіші та найбільш економічні ядра, розроблені для виконання базових завдань у реальному часі, з низьким енергоспоживанням;
- Cortex-M3 – середній рівень продуктивності, оптимізований для типових завдань вбудованих систем;
- Cortex-M4 – ядро з розширеннями для обробки сигналів (DSP) та апаратною підтримкою операцій із плаваючою точкою (FPU);
- Cortex-M7 – високопродуктивне ядро для систем із критичними вимогами до обчислювальної потужності, таких як обробка відео, аудіо та складних алгоритмів.

Контролери STM мають багату периферію, що залежить від конкретної моделі та серії (таблиця 1.1). Серед типових модулів: таймери (зокрема PWM, Capture/Compare), АЦП (ADC) і ЦАП (DAC) для роботи з аналоговими

сигналами, інтерфейси передачі даних: SPI, I²C, USART, CAN, USB, Ethernet, контролери сенсорного введення, модулі криптографії та захисту даних, підтримка Real-Time Clock (RTC) та Watchdog таймерів.

Таблиця 1.1 – Аббревіатура деяких найменувань мікроконтролерів STM

Сімейство/розрядність	STM8 STM16 STM32		
Специфікація	F – загальне призначення L – низьке енергоспоживання TS – Touch Screen W – wireless SOC		
Підсімейство/тип ядра	0xx – cortex M0 1xx – cortex M3 4xx – cortex M4		
Кількість виводів	F – 20 G – 28 K – 32 T – 36	H – 40 C – 48/49 R – 64 O – 90	V – 100 Z – 144 I – 176 B – 208 N – 216
FLASH пам'ять, kb	4 – 16 6 – 32 8 – 64	B – 128 Z – 192 C – 256 D – 384	E – 512 F – 768 G – 1024 I – 2048
Корпус	H – UFBGA N – TFBGA P – TSSOP	T – LQFP U – V/UFQFPN Y – WLCSP	
Задовільня температура (C)	6- -40 ... +85 7- -40... +105		
Опційно	xxx – prograded parts		

Розглянемо більш детально ядро Cortex.

ARM Holdings не виробляє і не продає процесорні модулі, що базуються на власних розробках, а лише ліцензує архітектуру процесора для зацікавлених сторін. ARM пропонує різні умови ліцензування, що відрізняються за вартістю та підсумковим результатом. Говорячи про ядра Cortex-M, також часто говорять про ядра інтелектуальної власності

(Intellectual Property, IP), маючи на увазі макет конструкції чіпа, який вважається інтелектуальною власністю однієї зі сторін, а саме ARM Holdings.

Існує три основні типи ядер, які складають назву компанії: A,R,M.

Cortex-A, що означає Application – прикладний, є серією процесорів, що надають широкий спектр рішень для пристроїв, що виконують складні обчислювальні завдання, такі як хостинг платформи операційної системи мобільних пристроїв (rich OS) (найбільш поширеними є Linux та його похідні). Ядрами Cortex-A оснащені процесори більшості мобільних пристроїв, таких як смартфони та планшети. Серед найбільш поширених ядер у цьому сегменті можна виділити 32-розрядні процесори Cortex-A7 та Cortex-A9, а також найновіші високопродуктивні 64-розрядні ядра Cortex-A53 та Cortex-A57.

Cortex-M, що означає eMbedded – вбудований, є лінійкою масштабованих, сумісних, енергоефективних і простих у використанні процесорів, призначених для недорогого ринку, що вбудовується. Сімейство Cortex-M оптимізовано для чутливих до вартості та енергоспоживання мікроконтролерів, що підходять для Інтернет речей (Internet of Things, IoT), зв'язок, керування двигуном, інтелектуальний облік, пристрої взаємодії з людиною (human interface devices, HID), автомобільні та промислові системи управління, побутова техніка, споживчі товари та медичні інструменти. У цьому сегменті ринку ми можемо знайти багатьох виробників інтегральних схем, які виробляють процесори Cortex-M: ST Microelectronics є одним із них.

Cortex-R, що означає Real-Time – реального часу, є серією процесорів, що пропонують високопродуктивні обчислювальні рішення для вбудованих систем, де необхідні надійність, висока доступність, відмовостійкість, ремонтпридатність та детермінований відгук у реальному часі. Процесори серії Cortex-R забезпечують швидку та детерміновану обробку та високу продуктивність при одночасному вирішенні складних завдань у режимі реального часу.

Процесор ARM Cortex-M3 – 32-бітне ядро, спеціально розроблене для використання у вбудованих системах з підвищеними вимогами до ефективності, надійності та енергоощадності. Це ядро є частиною третього покоління архітектури ARM Cortex і було створене як баланс між продуктивністю та спрощеною апаратною реалізацією, що робить його ідеальним для застосувань у промисловій автоматизації, побутовій електроніці, медичних приладах і системах керування.

На відміну від простіших 8- та 16-бітових рішень, Cortex-M3 підтримує повноцінну 32-бітову архітектуру, що дозволяє ефективно виконувати обробку даних, зменшуючи загальну кількість інструкцій для вирішення типових завдань. В основі архітектури лежить набір інструкцій Thumb-2, який поєднує компактність 16-бітових інструкцій з можливостями 32-бітових, забезпечуючи високу щільність коду без втрати обчислювальної потужності. Це дозволяє суттєво скоротити споживання пам'яті та підвищити швидкодію.

Однією з ключових переваг Cortex-M3 є вбудована підтримка апаратного векторного контролера переривань NVIC (Nested Vectored Interrupt Controller), що забезпечує пріоритетну обробку подій у реальному часі. Такий механізм дозволяє ефективно реагувати на зовнішні й внутрішні сигнали, що особливо важливо у системах реального часу, де кожна мілісекунда може мати значення.

Ще однією особливістю ядра є наявність блоку керування системними викликами (System Control Block), який відповідає за низькорівневе керування контекстом виконання. Також Cortex-M3 має вбудований апаратний стек та систему обробки винятків, що робить розробку програмного забезпечення безпечнішою та простішою з точки зору діагностики.

Хоч Cortex-M3 і не має апаратного FPU, він все ж дозволяє працювати з такими числами за допомогою програмної емуляції. Для багатьох застосувань, де не потрібна висока точність така реалізація теж є достатньою.

Cortex M4F – це ядро мікроконтролерів четверного покоління, що можуть працювати із числами з плаваючою крапкою (рис. 1.1).

Серія F4 також є першою серією STM32 з інструкціями DSP та форматом із плаваючою крапкою одинарної точності. Ця серія також призначена для мультимедійних програм, а деякі мікроконтролери пропонують спеціальну підтримку LCD-TFT [4].

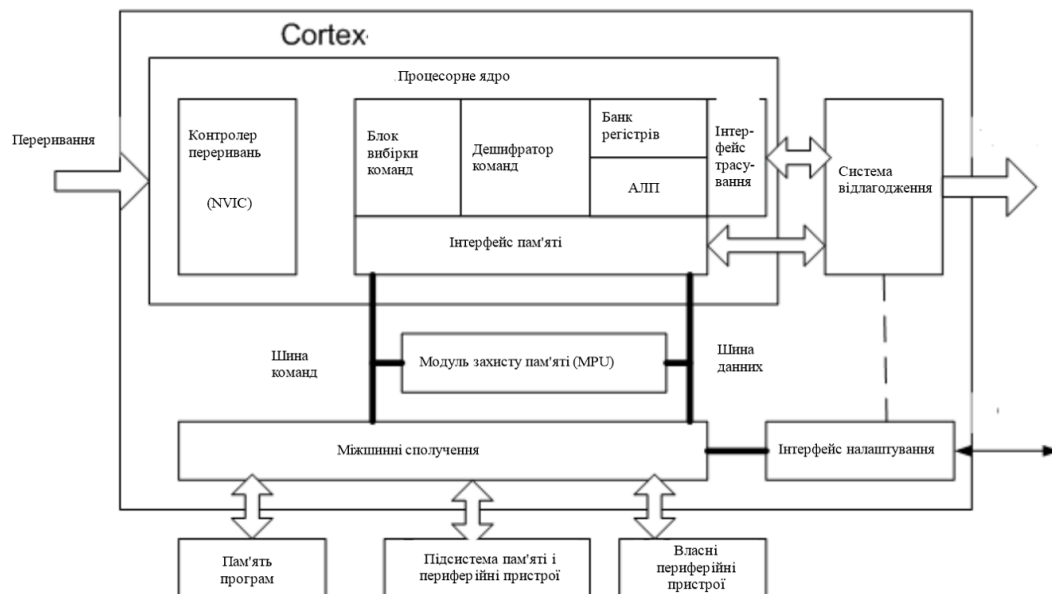


Рисунок 1.1 – Узагальнена блок-схема системи ядер Cortex-M

1.3 Мікроелектромеханічні системи у системах керування

Мікроелектромеханічні системи (MEMS) у системах керування забезпечують точне вимірювання фізичних параметрів, таких як прискорення, кутове положення, тиск або звук, що дозволяє реалізовувати високоточне автоматичне керування та зворотний зв'язок у компактних і енергоефективних пристроях.

MEMS – це мікропристрої найрізноманітніших конструкцій і призначень, які виготовлені ідентичними методами з використанням модифікованих технологій мікроелектроніки. Об'єднує їх дві ознаки. Перша – це мікронні розміри, друга – наявність механічних рухомих частин, тобто

MEMS це системи, що містять в собі взаємопов'язані мініатюрні механічні та електричні компоненти мікронних [2] розмірів

Сьогодні MEMS-пристрої застосовуються майже повсюдно. Це можуть бути мініатюрні деталі (гідравлічні та пневмоклапани, струминні сопла принтера, пружини для підвіски головки вінчестера), мікроінструменти (скальпелі та пінцети для роботи з об'єктами мікронних розмірів), мікромашини (мотори, насоси, турбіни завбільшки з горошину), мікророботи, мікродатчики та виконавчі пристрої, аналітичні мікролабораторії (на одному кристалі) тощо. Нові технології дозволяють впровадити MEMS у такі системи, як прилади збирання енергії і мікроелементи живлення.

Принцип дії MEMS ґрунтується на електрофізичних, електромеханічних, електрохімічних, електронно-оптичних, фотохімічних процесах і явищах з урахуванням ефектів масштабування за переходу від макрорівнів до мікрорівнів [2].

Для виготовлення MEMS використовують методи, розроблені для індустрії мікроелектроніки, зокрема для виробництва інтегральних мікросхем, які доповнені технологіями виробництва об'ємних структур мікросистемної техніки (мікробалок, шестерень, діафрагм, пружин тощо). Особливість технологій MEMS полягає в можливості одночасного створення на поверхні матеріалу підкладки безлічі механізмів без єдиної складальної операції. Тому виготовити на підкладці мільйон механізмів так само просто, як і один. Саме це і визначає дешевизну виробництва MEMS [2].

Основні приклади застосування MEMS у системах керування:

- акселерометри (датчики прискорення);
- гіроскопи;
- комбіновані сенсори (інерціальні вимірювальні блоки);
- мікрофони (MEMS-мікрофони);
- барометри та датчики тиску;
- MEMS-актуатори.

Розглянемо детальніше деякі з вищезгаданих прикладів МЕМС.

1.3.1 Акселерометр

Основним датчиком, що видає інформацію про рух об'єкта під дією активних сил, є акселерометр – прилад, який вимірює проекцію уявного прискорення – різницю між справжнім прискоренням об'єкта та прискоренням сили тяжіння [2]. Обов'язковою складовою чутливого елемента акселерометра є інерційна маса або маятник (рис. 1.2).

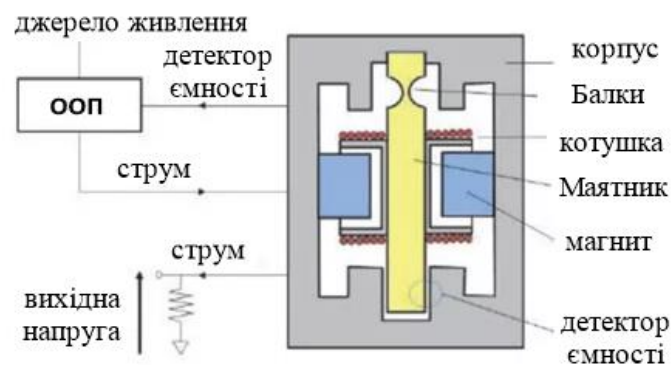


Рисунок 1.2 – Схема акселерометра

МЕМС акселерометри можна класифікувати за методами перетворення відхилення ІМ в електричний сигнал: ємнісні, п'єзоелектричні, п'єзорезистивні акселерометри; за конструктивним виконанням: МЕМС акселерометри поверхневої і об'ємної конструкції, а також за кількістю вимірювальних осей: одно-, дво- і тривісні акселерометри; за характером переміщення чутливого елемента відносно корпусу приладу: осьові та маятникові акселерометри [11].

1.3.2 Гіроскоп

Гіроскопом називають навігаційний прилад, основним елементом якого є швидкообертовий ротор, поміщений у карданний підвіс. Головною властивістю карданового підвісу є те, що закріплений в ньому обертовий

ротор буде завжди зберігати напрямок осі обертання незалежно від орієнтації самого підвісу (рис. 1.3).

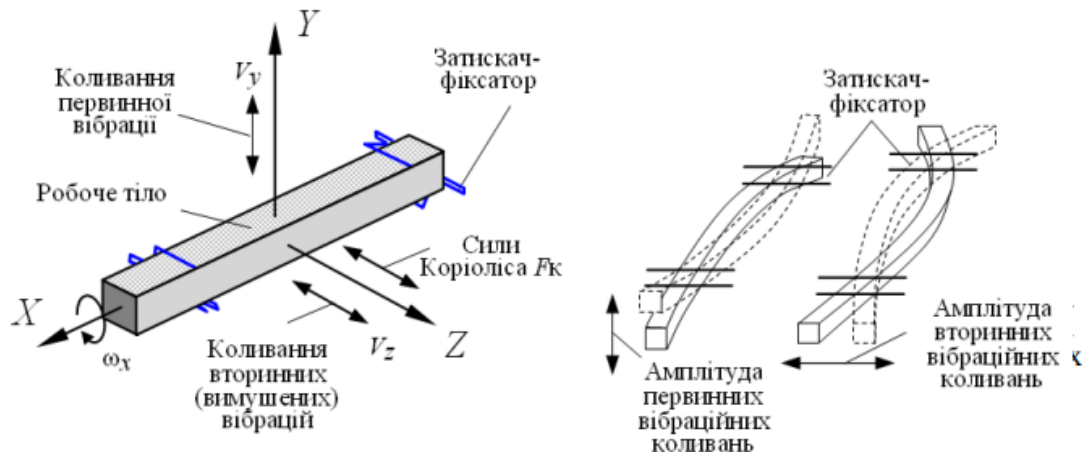


Рисунок 1.3 – Принцип роботи гіроскопа

Саме ця властивість гіроскопа – здатність зберігати в просторі незмінно напрямок осі обертання за відсутністю впливу на нього моментів зовнішніх сил і визначило його використання в системах орієнтації рухомих об'єктів. Зокрема авіаційні гіроскопічні прилади призначені для вимірювання кутового положення та кутових швидкостей літального апарата [2].

Водночас поряд з гіроскопічними датчиками кутової швидкості, основним елементом яких є обертовий механічний ротор, відомі пристрої, які виконують функції вимірювання кутової швидкості, але не мають ротора. Зокрема, до таких датчиків належать вібраційні гіроскопи, які містять вібрувальні деталі, що реагують на обертання об'єкта.

Принцип роботи таких гіроскопів ґрунтується на тому, що під час обертання вібруючого в одній площині тіла, наприклад, стрижня в ортогональній цим вібраціям площині з'являються знакозмінні сили Коріоліса F_k , які вигинають стрижень в площині дії цієї сили, тобто в цій площині викликаються вторинні вібраційні коливання [2].

Принцип дії балкових гіроскопів LL-типу повторює принцип роботи вібраційного гіроскопа на основі довгого стрижня: консольну балку змушують коливатися за допомогою п'єзоелементів у напрямку осі Y. Під

час обертання балки відносно осі Z під дією сили Коріоліса збуджуються коливання уздовж осі X [2]. Вони реєструються іншими п'єзоелементами.

Конструкції балок можуть бути різними. Наприклад, у стрижневих гіроскопах компанії «Елпа» використовується триполюсний [2] вібратор сталевий стрижень у пружному двосторонньому підвісі з поперечним перерізом у вигляді рівностороннього трикутника.

Аналогічну конструкцію стрижневого ММГ використовують і японські виробники вібраційних гіроскопів. До кожної грані стрижня приклеєні п'єзоелементи: на нижньому боці силовий (що збуджує вібрацію), на бічних гранях вимірювальні [2]. Основний недолік таких гіроскопів їх низька технологічність. Тому в усьому світі поширення набули біморфні вібраційні гіроскопи, які належать до класу стрижневих ММГ [11].

У біморфних гіроскопах резонатор являє собою послідовний біморф \square дві склеєні п'єзоелектричні пластини, що поляризовані в протилежних напрямках) [2]. До пластин (або однієї з них) прикладається напруга, одна пластина починає стискатися, друга розтягуватися, у результаті виникають коливання. Під час обертання біморфа під дією сили Коріоліса збуджуються вторинні коливання, які можна детектувати одними і тими ж електродами.

1.3.3 Барометр

Барометром називають прилад для вимірювання атмосферного тиску, який може бути використаний як для прогнозування змін погоди, так і для визначення висоти над рівнем моря. Принцип його роботи ґрунтується на здатності повітря створювати тиск, який змінюється в залежності від висоти, температури та метеорологічних умов. Основою традиційного барометра є чутливий елемент – зазвичай це анероїдна коробка або ртутна трубка, яка деформується під дією зовнішнього атмосферного тиску, внаслідок чого рухається стрілка котра відображає значення тиску.

Класичний анероїдний барометр містить герметичну металеву коробку з розрідженим повітрям всередині. При зменшенні атмосферного тиску

стілки коробки розширюються, а при його збільшенні – стискаються. Ці деформації передаються через систему важелів до стрілки, яка вказує значення тиску на шкалі. Такий підхід широко застосовувався в авіації, метеорології та побутових пристроях до появи цифрових датчиків.

З розвитком мікроелектроніки виникла можливість створення цифрових барометрів на основі сенсорів тиску, які використовують п'єзорезистивні, ємнісні або резонансні елементи. Наприклад, у п'єзорезистивному сенсорі тиску кремнієва мембрана деформується під дією атмосферного тиску, що викликає зміну опору вбудованих резистивних елементів. Зміна опору пропорційна тиску, що дозволяє точно його виміряти.

Цифрові барометри, які зазвичай інтегруються у MEMS, дозволяють проводити точні вимірювання в компактному корпусі з мінімальним енергоспоживанням. Такі датчики, як BMP180, BMP280, та інші, широко використовуються у смартфонах, навігаційних пристроях та альтиметрах.

Принцип роботи MEMS-барометра полягає в тому, що мембрана, розташована всередині сенсора, змінює своє положення під тиском навколишнього повітря. Зміна форми мембрани призводить до електричного сигналу, який обробляється інтегрованим АЦП (аналогово-цифровим перетворювачем) і передається до мікроконтролера через цифровий інтерфейс, зазвичай I²C або SPI.

Сучасні MEMS-барометри мають високу чутливість і точність – зміни тиску в межах декількох паскалів дозволяють визначати зміну висоти з точністю до кількох десятків сантиметрів. Це робить їх надзвичайно корисними для задач, пов'язаних із просторовою орієнтацією, контролем висоти та стабілізацією польоту.

1.4 Обмін даними між MEMS-пристроями

Мікроелектромеханічні системи (MEMS), такі як акселерометри, гіроскопи та барометри, забезпечують високоточні вимірювання у реальному

часі, що є критично важливими для систем стабілізації, навігації та керування об'єктами. Для повноцінного використання інформації, яку генерують ці сенсори, необхідно організувати ефективне отримання, обробку та передачу даних мікроконтролеру. Це досягається за допомогою цифрових інтерфейсів, таких як I²C, SPI та UART. Формування та структура даних MEMS-сенсори зчитують фізичні параметри, які перетворюються в аналогові або цифрові сигнали.

У більшості сучасних сенсорів вже вбудовані аналого-цифрові перетворювачі (ADC), які дозволяють отримувати оцифровані дані у форматі 8-, 12-, 14- або 16-бітних слів. Наприклад, тривісний акселерометр видає три незалежних значення прискорення по осях X, Y і Z, які доступні для читання з відповідних регістрів пристрою. Для отримання цих даних мікроконтролер ініціює сеанс обміну з сенсором через інтерфейс. Найчастіше застосовуються I²C або SPI, які забезпечують стабільну та швидку передачу інформації.

Наприклад, розглянемо будову формування даних у модулі акселерометра-гіроскопа (рис. 1.4).

MPU-60X0 складається з трьох незалежних вібраційних MEMS-гіроскопів, які виявляють обертання навколо осей X, Y та Z. Коли гіроскопи обертаються навколо будь-якої з осей вимірювання, ефект Коріоліса викликає вібрацію, яка виявляється ємнісним датчиком. Отриманий сигнал посилюється, демодулюється та фільтрується для створення напруги, пропорційної кутовій швидкості. Ця напруга оцифровується за допомогою окремих вбудованих 16-бітних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) для вибірки кожної осі.

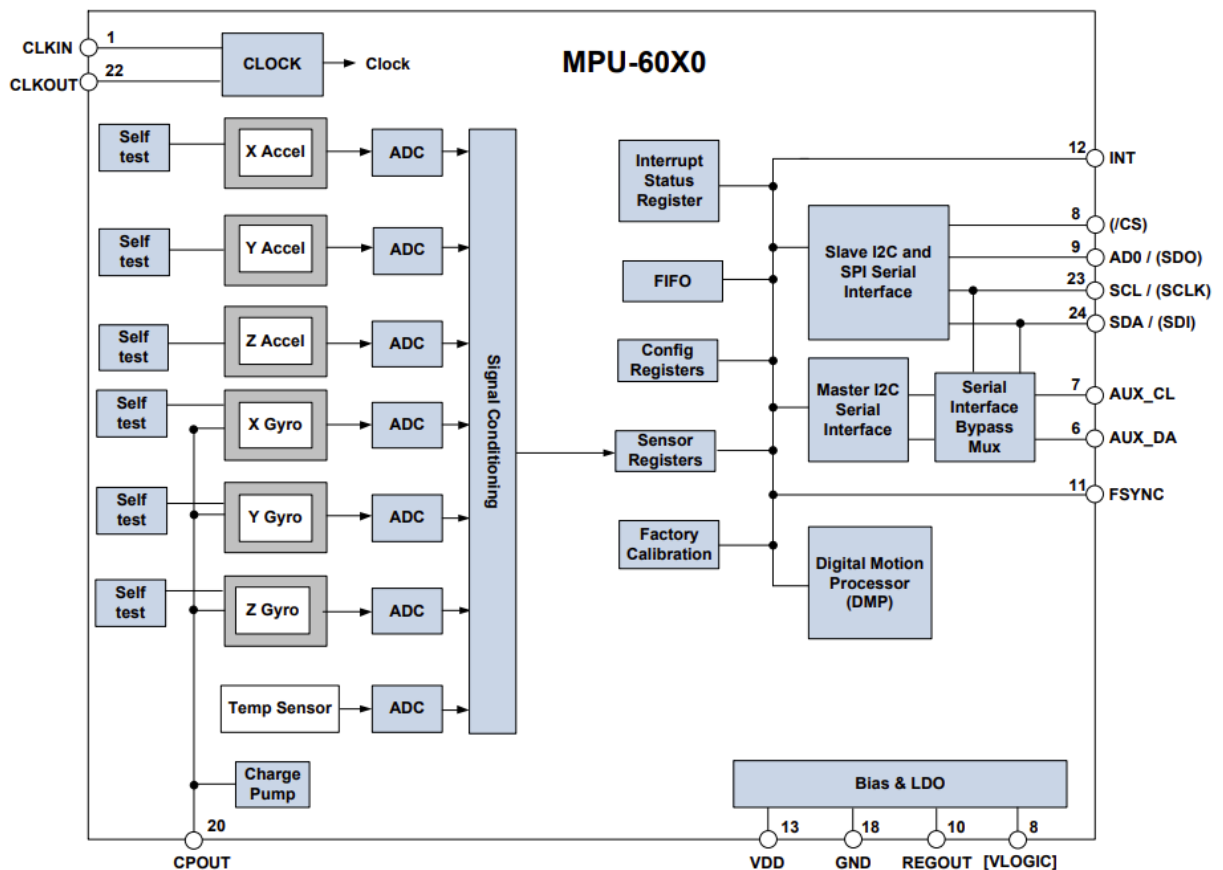


Рисунок 1.4 – Блок-діаграма МЕМС пристрою

Повний діапазон гіроскопічних датчиків може бути запрограмований цифровим способом на ± 250 , ± 500 , ± 1000 або ± 2000 градусів за секунду [5]. Частота дискретизації АЦП програмується від 8000 вибірок за секунду до 3,9 вибірок за секунду, а вибрані користувачем низькочастотні фільтри забезпечують широкий діапазон граничних частот [5].

Триосьовий акселерометр MPU-60X0 використовує окремі контрольні маси для кожної осі. Прискорення вздовж певної осі викликає зміщення відповідної контрольної маси, а ємнісні датчики виявляють це зміщення диференціально. Архітектура MPU-60X0 зменшує схильність акселерометрів до варіацій виготовлення, а також до теплового дрейфу.

Коли пристрій розміщено на рівній поверхні, він вимірюватиме $0g$ по осях X та Y та $+1g$ по осі Z. Масштабний коефіцієнт акселерометрів калібрується на заводі і номінально не залежить від напруги живлення. Кожен датчик має спеціальний сигма-дельта АЦП для забезпечення

цифрових вихідних сигналів. Повний діапазон цифрового виходу можна налаштувати на ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g або ± 16 g встановленням через інтерфейс спілкування певного значення до регістру управління.

Отже, датчиком використовується хоча б один зі стандартних інтерфейсів передачі даних, розглянемо найбільш розповсюджені.

Інтерфейс I²C розроблений для організації простого двотактного обміну даними між мікроконтролером та периферійними пристроями. Він дозволяє підключити декілька пристроїв до однієї шини, причому кожен з них ідентифікується унікальною адресою. Завдяки цьому спрощується схемотехніка, адже передача даних виконується лише двома лініями — для даних і для синхронізації. Перед початком обміну контролер ініціює сеанс, передаючи адресу пристрою і запит на читання чи запис. Сенсор відповідає, надсилаючи вміст потрібного регістру. I²C часто використовується для підключення акселерометрів та гіроскопів, оскільки забезпечує достатню пропускну здатність для більшості задач, водночас залишаючись енергетично ефективним і надійним.

SPI, на відміну від I²C, забезпечує значно вищу швидкість передачі даних і є синхронним повнодуплексним інтерфейсом. У SPI кожен пристрій має власну лінію вибору, що дозволяє мікроконтролеру точно визначати, з яким модулем він працює в конкретний момент. Така організація вимагає більшої кількості з'єднань, однак значно прискорює обмін. Це особливо важливо в системах, де сенсори мають працювати з високою частотою опитування, наприклад у польотних контролерах аеромоделей, які зчитують дані в сотнях герців. SPI дозволяє передавати дані у вигляді послідовностей байтів без затримок, а жорстка синхронізація по тактовій частоті забезпечує високу точність у часовій прив'язці. Крім того, завдяки простій логіці SPI легко реалізується апаратно, що дозволяє зменшити навантаження на центральне ядро мікроконтролера.

Ще одним варіантом обміну є UART – асинхронний інтерфейс, що часто використовується для комунікації між мікроконтролерами та

зовнішніми пристроями, такими як модулі бездротового зв'язку або GPS-приймачі. У випадку MEMS-сенсорів UART застосовується рідше, але може бути зручним для модулів, які мають вбудовану обробку та формують вже готові пакети даних. UART не вимагає синхронізуючого сигналу і працює на основі попередньо узгоджених параметрів, таких як швидкість передачі та кількість бітів на символ. Це робить інтерфейс зручним для простих конфігурацій, хоча і менш точним у високошвидкісних та критичних за часом застосуваннях.

Згідно технічних специфікацій, обраний у межах даного проєкту модуль акселерометра та гіроскопа має із зовнішніх інтерфейсів комунікації лише I2C, тому налаштування мікроконтролера будуть підлаштовуватися під неможливі до модифікації характеристики периферії.

Надалі, отримані від сенсора дані, котрі готуються із заданою частотою та, за наявності апаратної можливості, фільтруються периферією модуля з датчиком, піддаються більш складним та варіативним обчисленням. Адже використовувати дані можна багатьма способами, навіть використовуючи акселерометр не обов'язково записувати значення по усім вісям, навіть якщо датчик надсилає їх безумовно. Такі дані як від гіроскопа та акселерометра є точними, але водночас і надчутливими – цифровий шум може виникати від багатьох чинників, тому у головному обчислювальному пристрої повноцінної системи має відбуватися другорядна фільтрація даних. Фільтрація отриманих числових значень на предмет відхилення від норми є суто математичною задачею, тому можна використовувати як загальноживані алгоритми – ковзаюче середнє, ковзаюча медіана, так і на порядок складніші – алгоритм Калмана, Альфа-Бета фільтр та інші.

Після отримання оптимального продиференційованого значення воно відправляється до наступного етапу – відображення цього значення або будь-якого іншого програмного чи апаратного реагування.

1.5 Виконавчі елементи систем керування

Виконавчі елементи систем керування – це пристрої, які безпосередньо реалізують дії, визначені керувальними сигналами, перетворюючи їх у фізичний вплив на об'єкт керування, наприклад, у вигляді руху, зміни тиску, температури або положення.

1.5.1 Електромотори

Електродвигуни є ключовим компонентом у багатьох технологіях і застосуваннях. Вони перетворюють електричну енергію в механічну, забезпечуючи рух або обертання. Основні типи електродвигунів включають колекторні (щіткові), безщіткові двигуни постійного струму (BLDC), а також двигуни змінного струму, кожен з яких має свої особливості конструкції, принципи роботи, ефективність та застосування.

Розглянемо їх основні характеристики.

Колекторні (щіткові) двигуни постійного струму:

– щіткові двигуни працюють завдяки комутатору й щіткам, які передають електричний струм до обмоток ротора. Струм, проходячи через ці обмотки, створює електромагнітне поле, яке взаємодіє з полем постійних магнітів, змушуючи ротор обертатися (рис. 1.5);

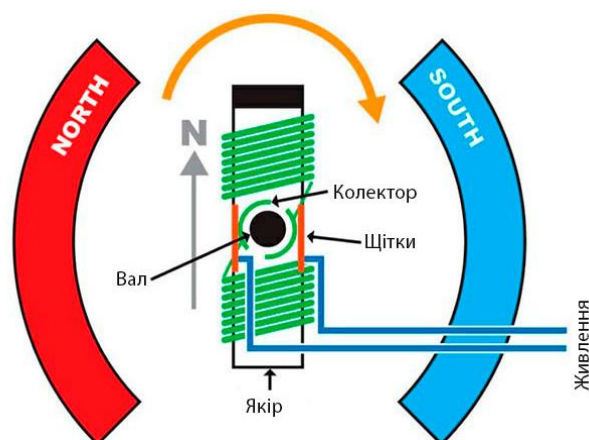


Рисунок 1.5 – Схема колекторного двигуна

– особливостями є простота конструкції та управління, відносно не дороге виробництво, мають механічні елементи, які зношуються (щітки та комутатор);

– із недоліків: менший термін служби через знос щіток, вищий рівень шуму та вібрацій, потреба регулярного обслуговування.

Такі двигуни найчастіше зустрічаються в недорогих моделях електроінструментів, побутових приладах, іграшках, де не потрібна висока продуктивність.

У безщіткових двигунах замість щіток і комутатора використовується електронна система управління. Постійні магніти прикріплені до ротора, а статор містить обмотки (рис. 1.6).

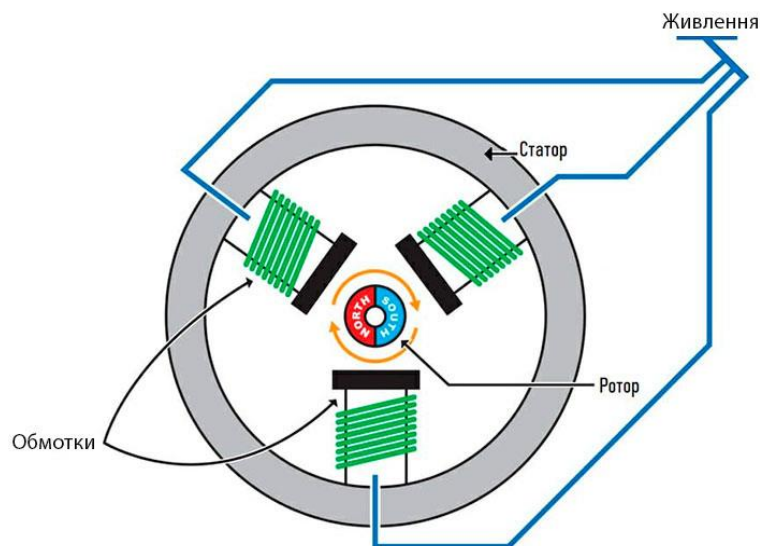


Рисунок 1.6 – Схема безколекторного двигуна

Керування струмом у статорі здійснюється електронікою, створюючи обертове магнітне поле, яке взаємодіє з полюсами ротора.

Особливостями безщіткових двигунів є висока енергоефективність завдяки відсутності механічних втрат на тертя щіток, компактніший розмір і менше нагрівання, вбудовані датчики (наприклад, датчики Холла) забезпечують точний контроль швидкості та позиції ротора.

Перевагами безщіткових двигунів є тривалий термін служби, тихіша робота, висока стабільність швидкості та крутного моменту, енергоефективність досягає 85–90%.

Недоліки безщіткових двигунів є вищий початковий вартісний бар'єр, складність конструкції через електронну систему управління.

У двигунах змінного струму магнітне поле створюється шляхом подачі змінного струму до обмоток статора. У асинхронних двигунах ротор обертається за рахунок індукції від магнітного поля статора. У синхронних двигунах ротор обертається синхронно з магнітним полем статора.

1.5.2 Стабілізація за допомогою пропелерів

Якщо об'єкт має знаходитись у повітрі то його балансування можна використати багатоосьові поворотні механізми, ролики, обертові двигуни. Використовуючи двигуни, до них кріпиться пропелер. Стабілізація за допомогою декількох пропелерів забезпечується регулюванням швидкості обертання кожного з них, що впливає на баланс сил і моментів, які діють на апарат.

Стабілізація здійснюється шляхом змін у швидкості обертання пропелерів (рис. 1.7).

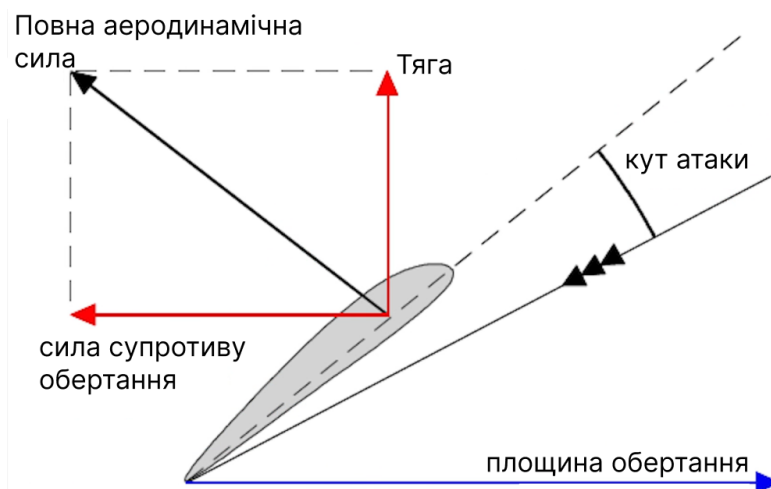


Рисунок 1.7 – Схема роботи гвинта

Збільшення або зменшення швидкості одного чи кількох пропелерів змінює підйомну силу, кут нахилу, обертання [6].

Для досягнення точного управління пропелерами використовуються ШІМ та система датчиків визначення зміни положення у просторі: акселерометри, гіроскопи та барометри вимірюють зміни положення, нахилу й висоти, передаючи ці дані контролеру для коригування.

Мультикоптери – пристрої, рух яких керується двигунами з пропелерами, мають переважно парну кількість двигунів розміщених симетрично відносно центра або осі корпусу. При цьому, якщо двигунів чотири, то два протилежних обертаються в одну сторону, а два інших у іншу, для чого мають обернений тип пропелерів. Це зроблено щоби корпус не обертася навколо себе внаслідок дії реактивного моменту усіх двигунів.

Водночас, аби змусити його зробити оберт вліво або вправо – два діагонально протилежних двигуни пришвидшуються, а два інших уповільнюються для збереження висоти. Для збільшення висоти всі пропелери обертаються швидше. Для нахилу вперед чи назад збільшується швидкість передніх або задніх пропелерів відповідно.

1.6 Огляд існуючих рішень

Станом на зараз існує багато цікавих рішень, створених на основі найрізноманітніших обчислювальних компонентів. Здебільшого подібні системи будують ґрунтуючись на тому, які контролери вибирають серійні виробники і копіюють їх прошивки або на модулі які поєднують у собі одразу декілька необхідних складових для зменшення розміру кінцевого пристрою.

Власні розробки також мають місце – системи радіокерування та контролю положення використовуються у авіоніці, любителів якої дуже багато. Так, давно існують рішення контролю положення об'єкта на основі плати із контролером ESP32 (рис. 1.8) [7], цей контролер має вбудований

модуль Wi-Fi і існує багато стандартних і чимала кількість користувацьких бібліотек для роботи із ним.

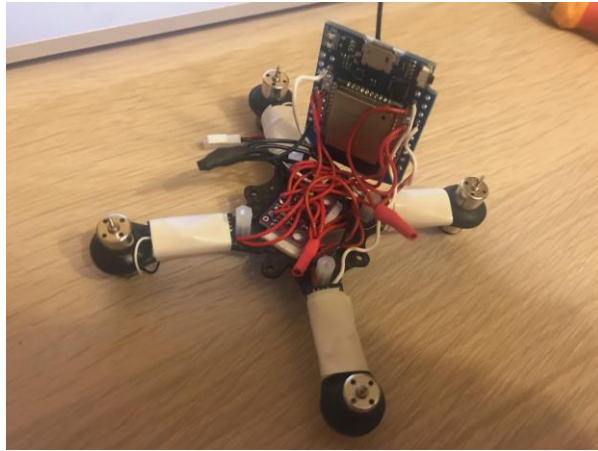


Рисунок 1.8 – Контролер польоту на основі ESP32

Такий пристрій має загальновідомий протокол зв'язку, а отже значно облегшує питання передачі сигналів керування. До того ж, не вимагаючи окремого модуля передачі даних, він має меншу вагу, що критично важливо.

У даному проєкті детально розглянуті проблеми із розробкою на які слід звертати увагу і які не є очевидними.

Більш продвинуті і обізнані із контролером Atmega користувачі спромоглися створити систему керування положенням на базі плати Arduino у однойменному середовищі розробки (рис. 1.9) [8].



Рисунок 1.9 – Контролер польоту на основі Arduino

Слід зазначити, що розробка систем реального часу із використанням плат відлагодження від Arduino набагато ризикованіше, бо контролер має менші апаратні можливості і сам по собі є повільнішим, тому пристрій буде або менш контрольованим, матиме помітні затримки у виконанні програми, або потребуватиме неординарних рішень задля оптимізації коду.

Усе ж, для менш поворотких об'єктів цей мікроконтролер цілком підходить. Якщо ціллю є створення системи бездротового керування іграшковим човном у ставку без стрімких течій, може використовуватися навіть такий чіп як ATmega8A-PU (рис. 1.10), використаний розробником Electronic Wizard у його успішно виконаному проєкті (рис. 1.11). У якості приймача-передавача радіосигналу був використаний радіомодуль NRF24.

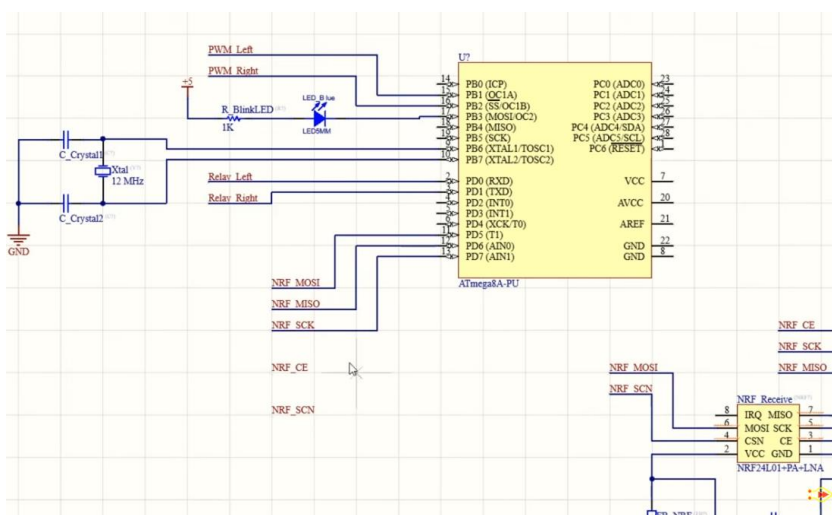


Рисунок 1.10 – Система радіокерування на ATmega8A-PU

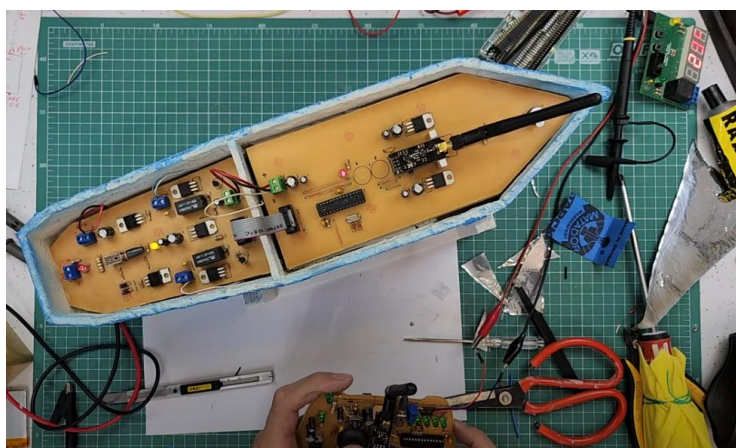


Рисунок 1.11 – Човник на радіокеруванні

Ще один інженер радіолюбитель розробив власну плату (рис. 1.12) для компактного розміщення на ній усієї необхідної електроніки для бездротового керування невеликими пропелерами на моторчикам що піймають відеокамеру у повітря і керуються зі звичайного планшета по WiFi.

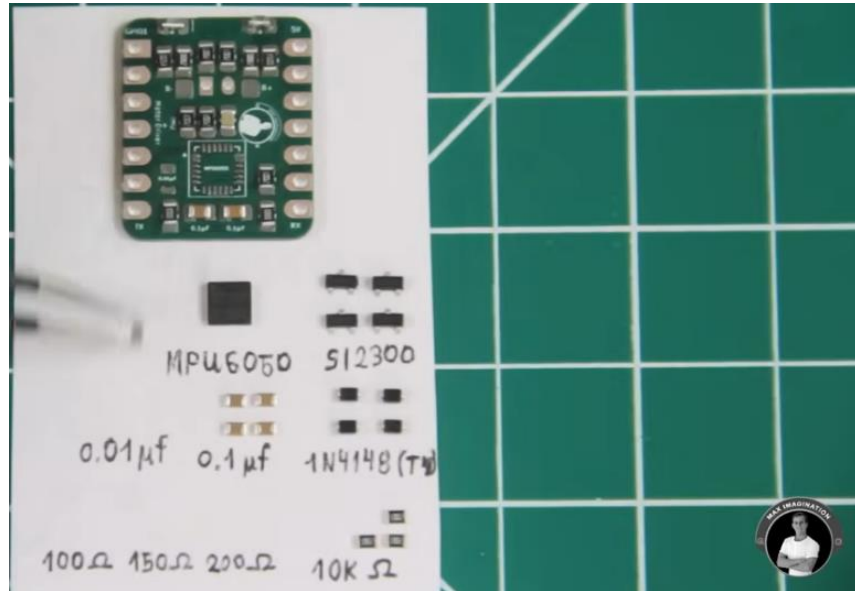


Рисунок 1.12 – Власноруч розведена плата для пристрою керування

Рішення на контролерах STM також мають місце (рис. 1.13). У деяких випадках їх можна запрограмувати таким чином, аби надалі можна було налаштувати за допомогою офіційних графічних застосунків, таких як BetaFlight Configurator.



Рисунок 1.13 – Контролер польоту на основі STM32F4

Мікроконтролери від компанії STM продаються у вільному доступі та широко використовуються для тестування різноманітних інженерних ідей.

Вибір контролера саме від цієї компанії обумовлений тим, що навіть якщо користувачу не сподобається результат роботи пристрою, або просто наскучить бавитися із власноруч зібраною системою – її можна розібрати і створити новий пристрій. Те, що подібні контролери повністю підходять для створення системи бездротового керування рухомим об'єктом підтверджується на величезній кількості сайтів із характеристиками контролерів польоту від серійних виробництв: зачасту вони використовують готовий обчислювальний модуль, коли не мають наміру витратити кошти на розробку власного, і вибір, звісно, припадає на найбільш розповсюджені.

Попри те, що уже існуючих систем бездротового керування рухомими об'єктами існує чимала кількість, технологія досі не вичерпана і невпинно розвивається як для побутових так і для комерційних інтересів. Актуальність розроблювальної системи бездротового керування на базі мікроконтролера STM32F1 визначається метою наблизитись або повторити готові професійні рішення простішим та дешевшим способом, з використанням так само якісних але менш модифікованих компонентів. Удосконалення розробки залежить від обраного напрямку: система може слугувати як удосконаленням для цікавої іграшки, на кшталт машинки на пульті керування, так і важливою частиною безпілотної таксі чи робота-поштаря.

Сама по собі система була і досі є актуальною, на прикладі такої розробки новачки та любителі у мікроконтролерній області знань дізнаються про численні можливості, принципи функціонування і тонкощі використаних модулів. Також, після опанування система може бути дороблена користувачем на власний розсуд або перероблена для втілення його нових ідей.

1.7 Мета та постановка задачі

Зростаюча потреба в компактних, недорогих і водночас потужних рішеннях стимулює постійне розширення сфери застосування мікроконтролерів – від робототехніки й автоматизованих систем керування до побутових приладів.

Проте, більшість готових рішень, випущених у серійне виробництво є дуже дорогими і значна їх частина недоступна середньостатистичному користувачу. Досить великий відсоток у ціноутворенні належить регулярній підтримці програмного забезпечення продуктів. У той же час, не усі системи навіть реального часу можуть стабільно працювати лише будучи виготовленими на підприємстві. І самі користувачі можуть бути не до кінця впевнені у необхідності дорогих пристроїв котрі зібрані із універсальних компонентів, які можна придбати окремо.

Тож, метою цього проєкту є розробка системи бездротового керування рухомим об'єктом на базі мікроконтролера STM32.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати існуючі рішення при проєктуванні систем керування рухомим об'єктом;
- обрати відповідне апаратне забезпечення для реалізації прототипу системи керування рухомим об'єктом;
- розробити алгоритм керування та автономної стабілізації;
- виконати збір прототипу на базі мікроконтролера;
- провести тестування прототипу.

2 МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМИМ ОБ'ЄКТОМ

Модель системи бездротового керування рухомим об'єктом на базі мікроконтролера STM32 полягає у побудові механізму, у якому мікроконтролер отримуватиме дані від сенсорів руху (лістинг А.1), вираховуватиме поточне положення тіла і стабілізуватиме його шляхом регулювання потужності горизонтально розташованих моторів із пропелерами (рис. 2.1).

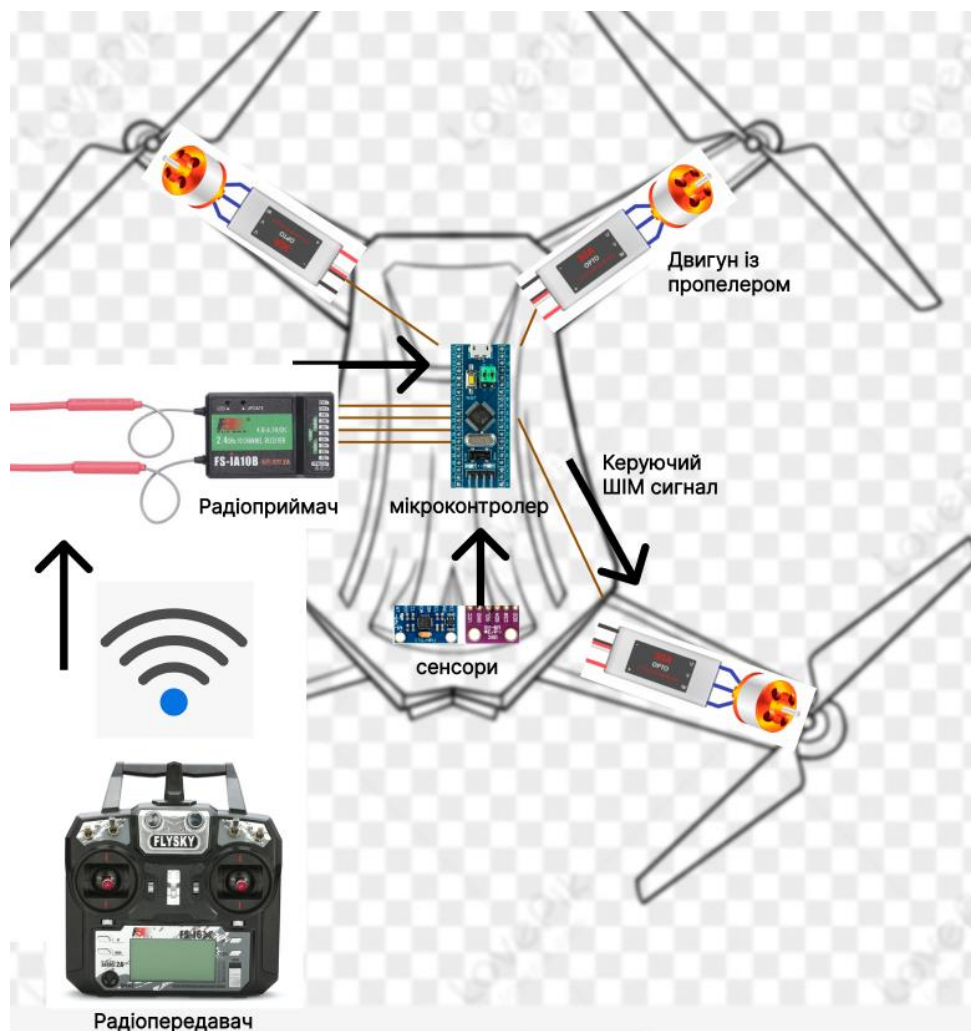


Рисунок 2.1 – Модель системи бездротового керування рухомим об'єктом

Таким чином, при отриманні даних від сенсорів (лістинг А.2), які свідчать про нахилення тіла, або сигналу від пульта керування,

мікроконтролер буде подавати сигнал на драйвер кожного із моторів і вирівнюватиме об'єкт.

Пристрій матиме датчик акселерометра й гіроскопа, барометра, радіоприймач і процесорний модуль котрий оброблюватиме отримані дані.

Також необхідні декілька електромоторів для реагування на зміну положення досліджуваного об'єкта. Наразі використані безщіткові електродвигуни, до них будуть прикріплені пластмасові пропелери для запобігання їх поломки при аварійному зіткненні.

Самі мотори керуватимуться через спеціальний драйвер для безколекторних моторів. Через високе енергоспоживання моторів, для кожного з них необхідний окремий драйвер. Усі драйвери підключатимуться до акумуляторної батареї у спільних точках. Керування відбуватиметься через цифровий вхід який очікує імпульс, переважно у діапазоні від 800 до 2300 мікросекунд.

Водночас, кожен драйвер має виходи живлення з напругою 5 вольт, тому мікроконтролер можна заживити від одного з них. Так само буде заживлений і радіоприймач

Пристрій збиратиметься на безпаєчній макетній платі, на неї зручно кріпиться плата мікроконтролера а також легко з'єднуються компоненти без необхідності паяння, згодом апаратну частину буде перенесено на розмічену для паяння макетну плату.

Програмування мікроконтролера може здійснюватися через програматор ST-LINK V2 або перехідник USB-UART.

2.1 Вибір компонентів та схема прототипу системи бездротового керування

Розглянемо схему прототипу, побудованої на базі запропонованої моделі бездротового керування рухомим об'єктом (рис.2.2), де:

- 1 – мікроконтролер;

- 2 – модуль з датчиками акселерометра та гіроскопа;
- 3 – модуль барометра;
- 4 – радіоприймач;
- 5 – драйвер для безщіткового електродвигуна та електродвигун;
- 6 – літій-полімерна акумуляторна батарея;
- 7 – USB-UART перетворювач.

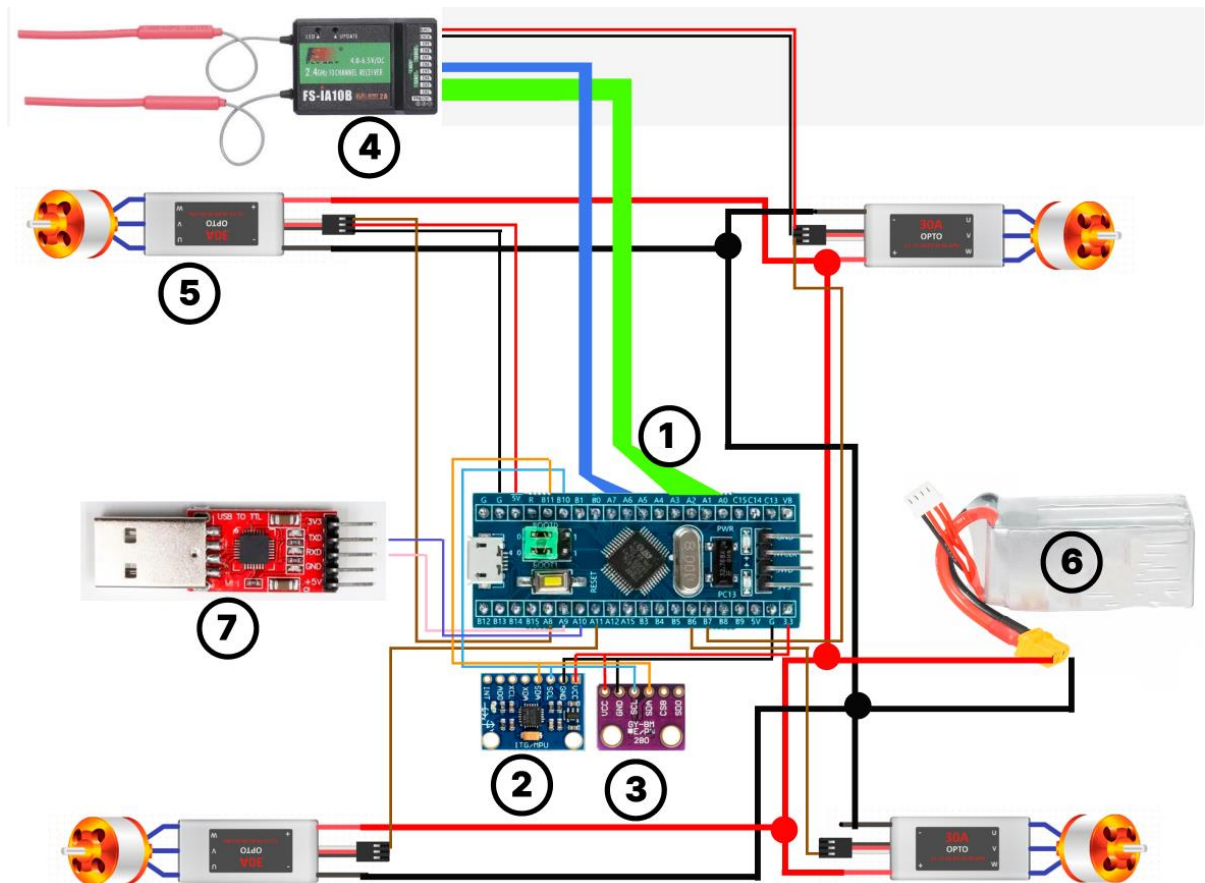


Рисунок 2.2 – Схема пристрою

Як видно на схемі апаратною основою для розробки системи бездротового керування рухомим об'єктом є:

- мікроконтролер з лінійки STM32F1, для обчислень даних від сенсорів та вираховування необхідного реагування на сигнали передані до радіоприймача;

- модуль акселерометра та гіроскопа MPU6050 для обчислення векторів руху тіла;

- безщіткові електродвигуни A2807 1300kv із пропелерами для коригування положення тіла;
- драйвер керування безщітковим двигуном для керування високим струмом та заживлення мікроконтролера й радіоприймача;
- радіоприймач FS-IA10B котрий перетворює керуючі сигнали від апаратури на окремі сигнали PWM:
- літій-полімерний акумулятор на 6 секцій, загальною ємністю 3.8 ампер, номінальною напругою 22.2 вольт та максимальним струмом розрядки 60С.

Для програмування використовуватиметься ST-LINK та спеціальні виходи swio і swclk, для програмування USB-UART перехідником через послідовний порт треба використовувати виходи PA9 та PA10.

Мотори керуються через піни PA8, PA11, PB6 та PB7; сигнали з радіоприймача отримуються на PA0-PA3 та PA6-PA7.

Сигнали керування передаватимуться за допомогою спеціальної апаратури FlySky I6X (рис. 2.3) та прийматимуться радіоприймачем FS-IA10B.



Рисунок 2.3 – Апаратура-радіопередавач

Такий приймач здатний отримувати сигнали на великій відстані і що головне – має три інтерфейси підключення до контролера: I-BUS, S-BUS – шини передачі даних у цифровому форматі по одній фізичній лінії, та PWM –

сигнали з кожного радіоканалу передаються по окремому провіднику. Хоч передача сигналів PWM вимагає більше проводів, вона легша та зрозуміліша у реалізації, тому керуючі сигнали отримуватимуться саме по ній.

Апаратура, або радіопередавач являє собою пульт із важелями, точне положення яких кодується у числове значення та передається до спареного приймача. Працює ця пара пристроїв на діапазоні частот від 2.4055 до 2.472 ГГц розбитим на канали із кроком 500 кГц, оголошена дальність до півтора кілометри, проте насправді у середньому сигнал без додаткових підсилювачів стає критичним при відстані 600-800 метрів.

Апаратуру-радіопередавач теж можна гнучко налаштувати – визначати протокол передачі, назначати важелям номер каналу переді його значення, значення при крайньому положенні. Головною перевагою цих пристроїв є їх висока ефективність та сумісність – вони легко утворюють пару і не перешкоджають подібним парам, можна вибрати стандартні заготовлені налаштування, якщо треба незвичайне налаштування то воно не займає багато часу.

Для зручності досліджень та подальшої роботи системи в якості основи буде використана карбонова рама (рис 2.4) на яку кріпитимуться усі компоненти. При розташуванні елементів слід уважно слідкувати аби нічого не потрапляло у зону досяжності пропелерів, усі провідники біля неї мають бути надійно закріплені.



Рисунок 2.4 – Карбонова рама

Отримані радіоприймачем сигнали передаються до плати із мікроконтролером STM32F103C8T6. У даного контролера доволі мало таймерів, 2 ADC на 10 каналів, 7 таймерів та до дев'яти інтерфейсів, проте він все ще здатен працювати на високих тактових частотах – до 72 мегагерц. Контролер буде приймати ШІМ сигнал по 6 каналах, спілкуватися з двома датчиками по інтерфейсу I2C та генерувати власні 4 ШІМ.

Спілкуватися контролер буде із модулем акселерометра й гіроскопа MPU3060 та модулем барометра BMP280 (рис. 2.5).

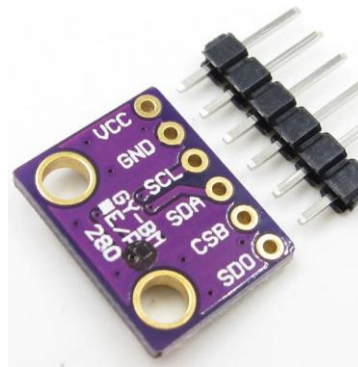


Рисунок 2.5 – Модуль барометра

Модуль барометра потребує живлення 3.3 вольт, здатен вимірювати тиск у діапазоні від 300hPa до 1100hPa, це еквівалентно від 9000 м до -500 м над рівнем моря. Надсилає значення модуль по інтерфейсу I2C.

Модуль акселерометра й гіроскопа (рис. 2.6) має трьохосьовий акселерометр та трьохосьовий гіроскоп. Дані з датчиків із певною регулярністю, яку можна налаштувати, перезаписуються до регістрів чипа – саме до них треба звертатися щоразу для отримання даних. Також, сам модуль має вбудований фільтр високих частот, тобто пошкоджені дані та перешкоди можна усувати можливостями сенсора, розвантаживши процесорний час керуючого мікроконтролера.

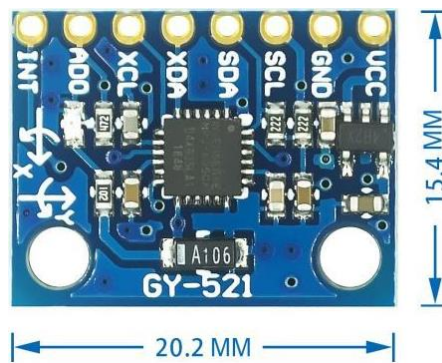


Рисунок 2.6 – Модуль акселерометра й гіроскопа

Важливим моментом у цьому сенсорі є його попереднє розташування, оскільки він вимірює значення по трьом вісям, треба знати куди вони направлені. На корпусі кристалу є помітка у вигляді цятки, якщо розташувати чіп так, щоб цятка була зверху-зліва, то в праву сторону, горизонтально, буде направлена вісь x , перпендикулярно до неї і паралельно до землі напрямлена вісь y , і угору напрямлена вісь z (рис. 2.7).

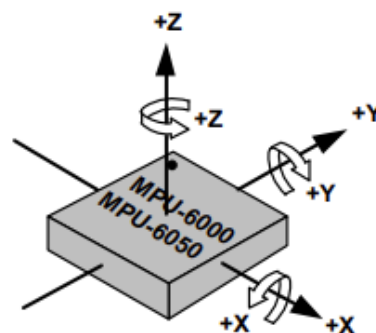


Рисунок 2.7 – Орієнтація осей чутливості та полярність обертання

На основі отриманих даних від радіоприймача та датчиків, мікроконтролер обчислює якою має бути потужність двигунів у даний момент аби положення об'єкта було стабільним і водночас задовольнити очікування по корекції руху від користувача. Обчислене значення потужності контролер надсилає до драйверу безщіткового двигуна: він має два силових провідники живлення, три силових для подачі струму на двигун, один для

керуючого сигналу та два з низькою напругою для заживлення бортової електроніки. Таким чином, подаючи на цей драйвер струм від акумулятора, від самого драйвера можна заживити плату мікроконтролера напругою +5 вольт, не додаючи окремої батарейки на п'ять вольт.

І наприкінці життєвого циклу керуючого сигналу, після багатьох перетворень, від драйвера на електродвигун A2807 1300kv подається напруга. Безщітковий двигун має декілька котушок на роторі, зазвичай їх число кратне трьом, і постійні магніти на статорі, коли на котушки по чергово подається струм – статор примагнічується до тієї, на яку в даний момент подається живлення, таким чином, по чергово подаючи струм на котушки керується напрямом та швидкістю рухомої частини двигуна. Обраний двигун працює від живлення напругою до 25 Вольт та сили струму від 10 до 40 Ампер (рис. 2.8)

Item No.	Prop (inch)	Throttle (%)	Voltage (V)	Current (A)	Rpm	Thrust (gf)	Input Power (W)	Thrust Efficiency (G/W)
X2807 1300KV	GF 7*3.5*3	40	25	9.95	13409	822	248.75	3.3
		50	25	13.5	14819	1017	337.5	3.1
		60	25	17	16149	1207	425	2.9
		70	25	21.5	17359	1415	537.5	2.7
		80	25	27.5	19053	1685	687.5	2.6
		90	25	34.5	20426	1947	862.5	2.4
		100	25	39	20879	2041	975	2.2

Рисунок 2.8 – Робочі характеристики двигуна A2807

Загальний алгоритм роботи виглядатиме наступним чином (рис. 2.9).

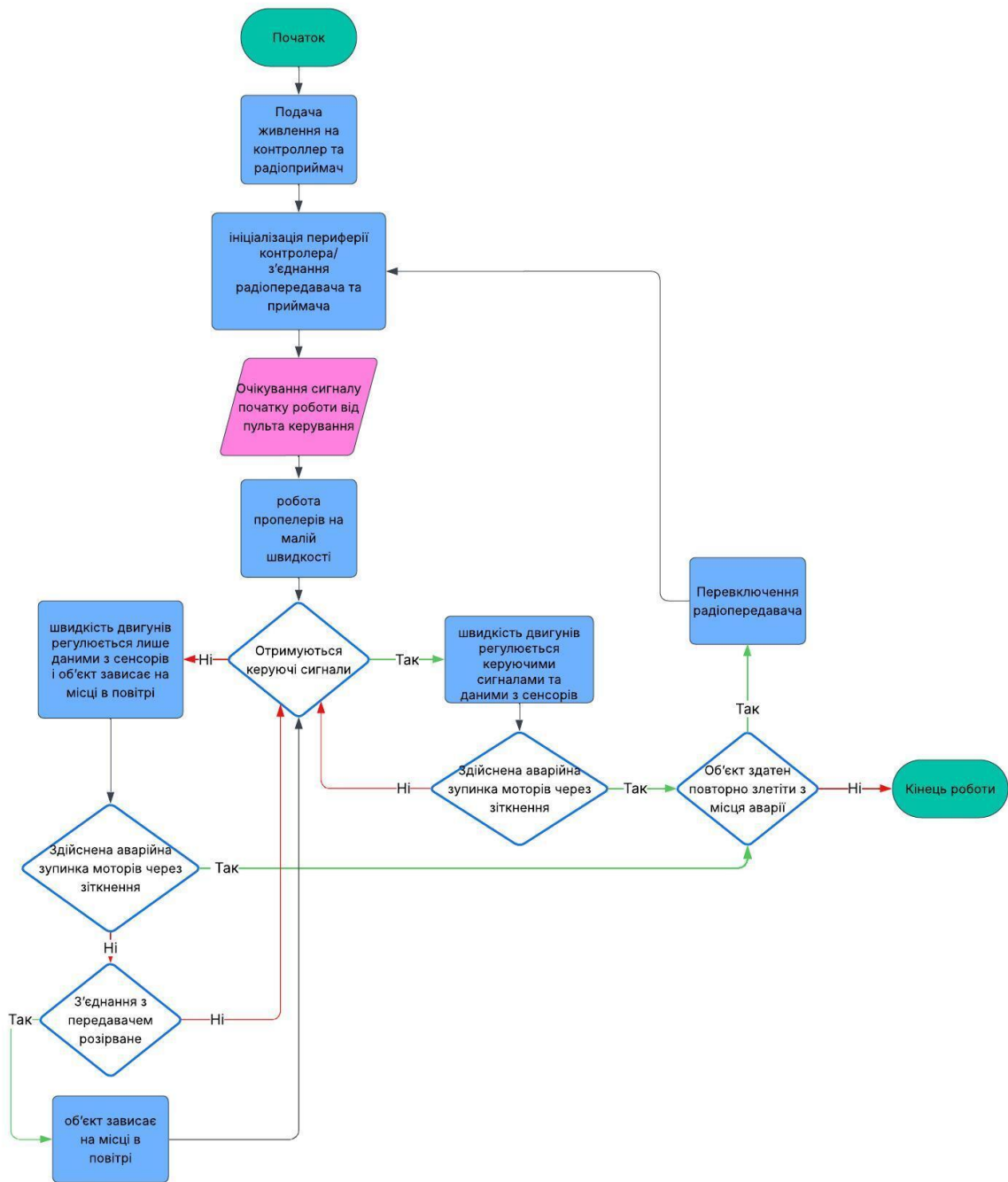


Рисунок 2.9 – ГСА роботи системи керування

2.2 Автономність системи керування

Для відлагодження пристрою достатньо підключити його до сумісного інтерфейсу комп'ютера, який одночасно матиме лінії живлення 5В. Проте готовому пристрою для повноцінної роботи необхідно набагато потужніше джерело. У проєктах авіамоделювання переважно використовують літій-

полімерні, літій-іонні, літій-залізофосфатні, нікель-металгідридні або нікель-кадмієві акумулятори.

Тип акумулятора важливий не лише у питанні тривалості та швидкості польоту, а й для безпеки, надійності та вагових характеристик пристрою. У цьому контексті важливо розглянути основні типи акумуляторів, які найчастіше використовуються в авіамоделюванні, порівняти їх технічні характеристики та визначити оптимальні умови експлуатації та зберігання.

Нікель-кадмієві та літій-залізофосфатні використовуються коли необхідна робота при екстремальних температурах, також у них досить високий допустимий поріг пускового струму та велика кількість циклів заряджання без втрат характеристик, проте мають трохи більшу вагу у перерахунку Вт*год/кг. Проте подібні акумулятори втрачають актуальність у низці сфер використання через високу токсичність.

Літій-іонні акумулятори мають високу енергетичну щільність – до 300 Вт*год/кг, при цьому менш вразливі до пошкоджень ніж літій-полімерні, і також мають досить гарні показники перезаряджання – до 500-1000 циклів. Проте такі джерела мають меншу пропускну здатність, переважно не більше ніж 3С, де 1С це ємність акумулятора у амперах, та вимагають особливого контролю заряджання.

Літій-полімерні батареї – найпоширеніші у використанні завдяки своєму балансу ємності та ваги, мають можливість надавати робочий струм більше 50С і різноманітні форм-фактори. За гарні характеристики струму акумулятор має низький показник перезаряджання – до 300 циклів при активному використанні, та критичні до дотримання правила зберігання.

Ці акумулятори, як і вище розглянуті, бажано заряджати спеціальними зарядними пристроями, котрі зберігають баланс між напругою у кожній секції батареї, не допускаючи різниці напруг більше ніж 0.005 вольт. Заряджений акумулятор мусить мати 4.2 вольт на кожній секції, зазвичай їх кількість кратна двом. Якщо акумулятор тривалий час не буде використовуватись його слід зарядити до напруги 3.8 вольт на секцію і перевіряти її кожні декілька

місяців, при тривалому зберіганні з нижчою напругою характеристики акумулятора безвідмовно погіршуються. Також подібні джерела живлення чутливі до механічних пошкоджень та коротких замикань – при пошкодженні ізоляції між секціями або навіть між складками однієї секції елемент миттєво спалахне та невдовзі вибухне (рис. 2.10). Через це дані акумулятори часто зберігають і утримують при заряджанні у металевих ємностях.



Рисунок 2.10 – Розгорнута секція акумулятора.

У даному проєкті використовуватиметься саме літій-полімерний акумулятор з номінальною напругою 22.4 Вольт на 6 секцій, для заряджання використовуватиметься зарядний пристрій iMAXB6AC – один із різноманітних клонів багатофункціональних зарядних станцій (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Акумулятор та зарядний пристрій

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОТОТИПУ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ

Для початкового налаштування контролера використовуватиметься середовище CubeMX. Після створення пустого проєкту з початковими налаштуваннями контролера, проєктування та налагодження програмного коду, а також відлагодження його роботи буде здійснюватися у Keil uVision5.

3.1 Прототип системи бездротового керування

Процес створення функціонального прототипу пристрою розділимо на два ключові етапи: збирання обчислювальної частини та складання механічної структури. Для досягнення надійності й функціональності системи необхідно детально спланувати порядок дій, підібрати відповідні компоненти, забезпечити їхню сумісність і правильно організувати з'єднання.

Основою обчислювальної частини є мікроконтролер, до якого підключаються периферійні елементи: драйвери двигунів, сенсори, а також джерело живлення. З огляду на етап прототипування, усі компоненти будуть змонтовані на макетній платі під пайку. Це дозволяє надійно з'єднати всі необхідні контакти, уникнути брязкоту контактів, характерних для безпаячних макетних плат, і в майбутньому – легко перенести схему на друковану плату.

Побудована обчислювальна частина пристрою на макетній платі зображена на рисунку 3.1. Така плата для макетування жорстка і має готові отвори до яких легко припаювати контакти мікроконтролерних модулів. Також ця плата має отвори у кожному куті за які є можливість прикріпити усю систему на ній до більшої основи, наприклад основного корпусу пристрою.

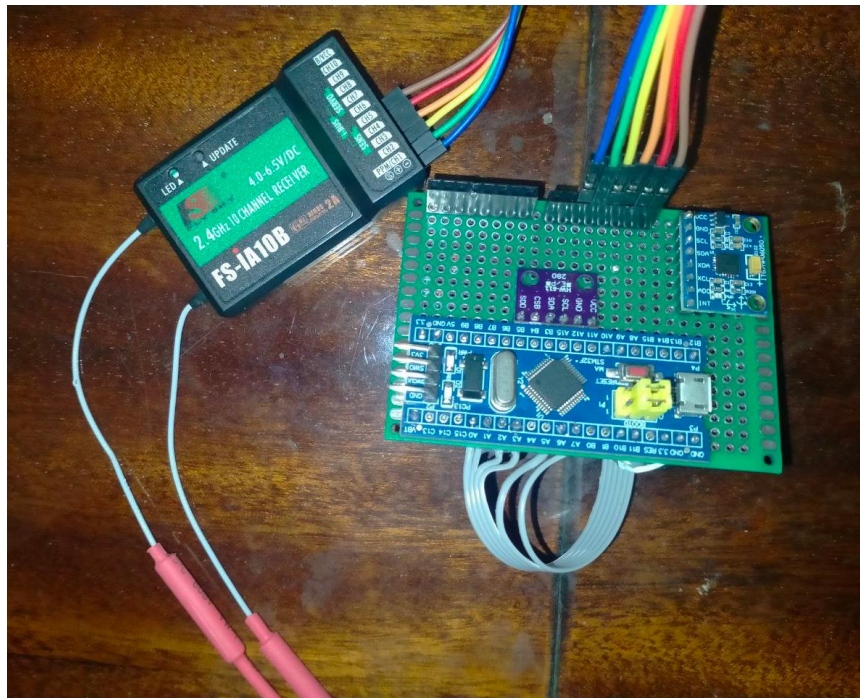


Рисунок 3.1 – Зібрана обчислювальна частина

Розроблений код інструкцій роботи пристрою компілюється у середовищі Keil uVision та програмується до мікроконтролера (рис. 3.2).

```

//left-down - 90x 90y

snprintf(My_Str,90,"Kalman_x %1f", MPU6050.KalmanAngleX);
ST7735_WriteString(0,0,My_Str,Font_7x10,ST7735_BLUE,ST7735_BLACK);

snprintf(My_Str,90,"Kalman_y %1f", MPU6050.KalmanAngleY);
ST7735_WriteString(0,22,My_Str,Font_7x10,ST7735_BLUE,ST7735_BLACK);

/*****/
snprintf(My_Str,90,"MototPower: %d ", 0);
ST7735_WriteString(0,44,My_Str,Font_7x10,ST7735_BLUE,ST7735_BLACK);

snprintf(My_Str,90,"MototPower: %d", (TIM2->CCR1));
ST7735_WriteString(0,44,My_Str,Font_7x10,ST7735_BLUE,ST7735_BLACK);
/*****/

```

Рисунок 3.2 – Початок прошивки контролера

3.2 Програме забезпечення та його налаштування

Розглянемо налаштування застосунка STM32CubeMX. Застосунок CubeMX є офіційним середовищем, у якому можна знайти документацію на

усі чіпи STM32 та налаштувати початкові характеристики для програмного проєкту, такі як вибір використовуваних таймерів, їх призначення, активація інтерфейсів, визначення тактової частоти роботи кристалу.

Замість того щоб писати об'ємний код, в якому визначатимуться усі необхідні для роботи пристрої периферії контролера, достатньо поставити галочку у списку.

При першому запуску застосунку STM32CubeIDE програма запропонує створити середовище з проєктами. Можна дати власну довільну назву або залишити назву за замовчуванням.

Проєкт буде містити усі необхідні файли та бібліотеки, необхідні для компіляції та збірки. Щоб створити новий проєкт потрібно зайти в меню «File», у ньому вибрати «New STM32 Project», або через графічний інтерфейс у головному вікні (рис. 3.3), де можна обрати використовуваний чіп, плату, або створити проєкт із готовим простим кодом? в якому пояснено певні функції взаємодії інтерфейсів пристрою.

Перевагою такого способу створення проєкту є включення великої кількості готових бібліотек, які сильно спрощують звернення до пам'яті, регістрів, інтерфейсів мікроконтролера. Бібліотеки є офіційними і звільняють від написання шаблонних функцій звернень до пам'яті, обробки переривань інтерфейсів, аналіз вхідних даних побітово. Проте у деяких випадках краще обходитись без певних функцій бібліотек або перероблювати їх під власні потреби, адже вони були створені як універсальні і для багатьох задач не є оптимізованими.

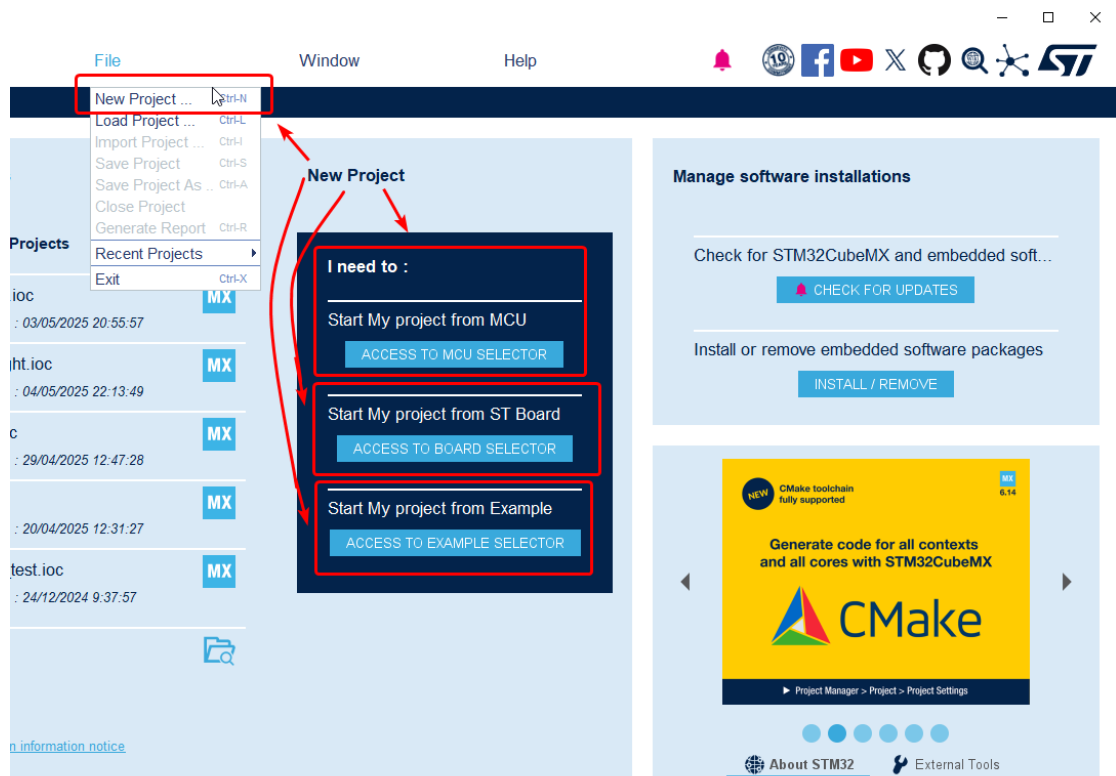


Рисунок 3.3 – Створення нового проєкту

На рисунку 3.4 показано кристал, піни та інтерфейси які можна налаштувати.

Також можна одразу вибрати назви пінів для керування ними у програмі у вигляді змінних. У вкладці Clock Configuration налаштовується частота надходження тактового сигналу на периферію контролера: окремі групи таймерів, комунікаційні інтерфейси та навіть саме ядро контролеру.

Після налаштування треба згенерувати проєкт для одного з декількох середовищ: MDK-ARM для KeilVision, CMake для власних середовищ таких як VSCode, STM32CubeIDE для середовища програмування від STM та інших редакторів.

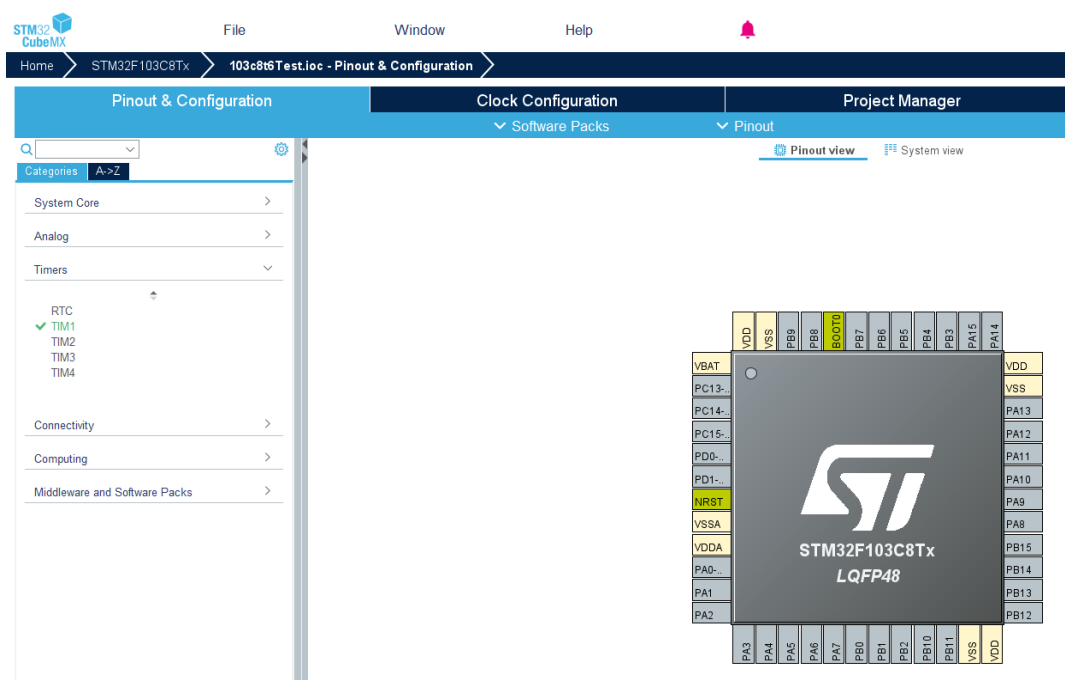


Рисунок 3.4 – Вибір цільового кристалу

У STM32CubeMX необхідно увімкнути інтерфейс I2C, та декілька таймерів які керуватимуть чотирма виводами генерації PWM та шести каналами захоплення сигналу (рис. 3.5).

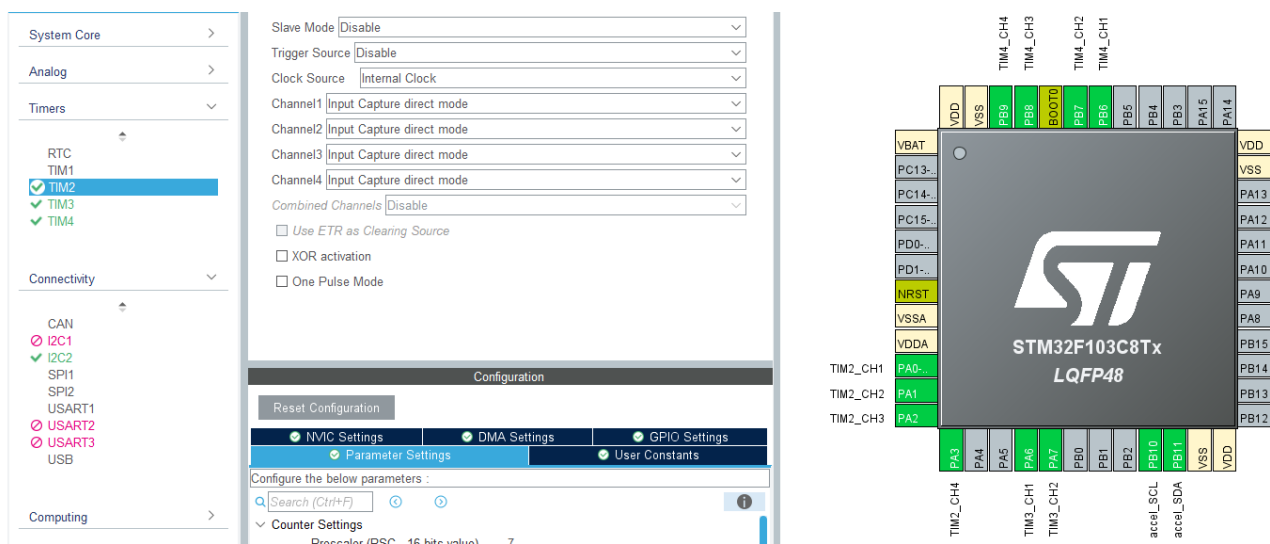


Рисунок 3.5 – Увімкнення інтерфейсів у CubeMX

Також кожному таймеру необхідно вказати джерело сигналів тактування. Таймеру, відповідальному за генерацію ШІМ бажано встановити

дільник частоти, відповідно до частоти яка надходить на інтерфейс таймера, аби отримати 1 мегагерц та період підрахунку можна виставити 20000.

Для отримання даних від радіоприймача використана функція захоплення каналу яка викликає переривання при зміні полярності вхідного сигналу [9]. Після переривання записуються значення до якого дорахував таймер (рис. 3.6) і рахується період сигналу а також час його активної фази.

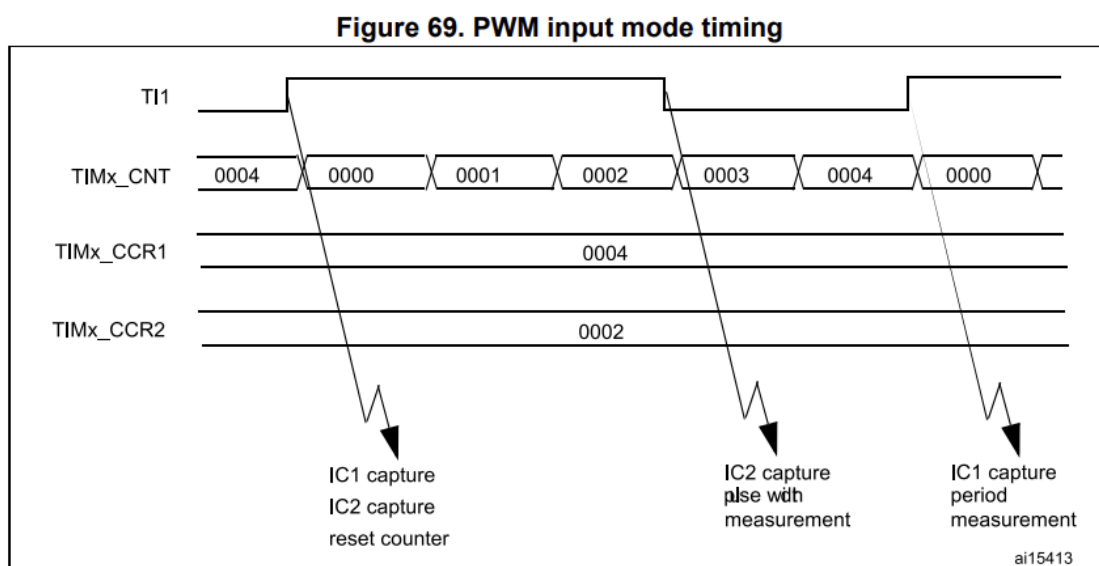


Рисунок 3.6 – Робота захоплення каналу

Розглянемо налаштування застосунка VS Code.

Для налаштування VS Code треба встановити розширення STM32 VS Code Extension та додати шлях до STM32Cube, STMCUFinder, STM32CubeCLT folder (рис. 3.7).

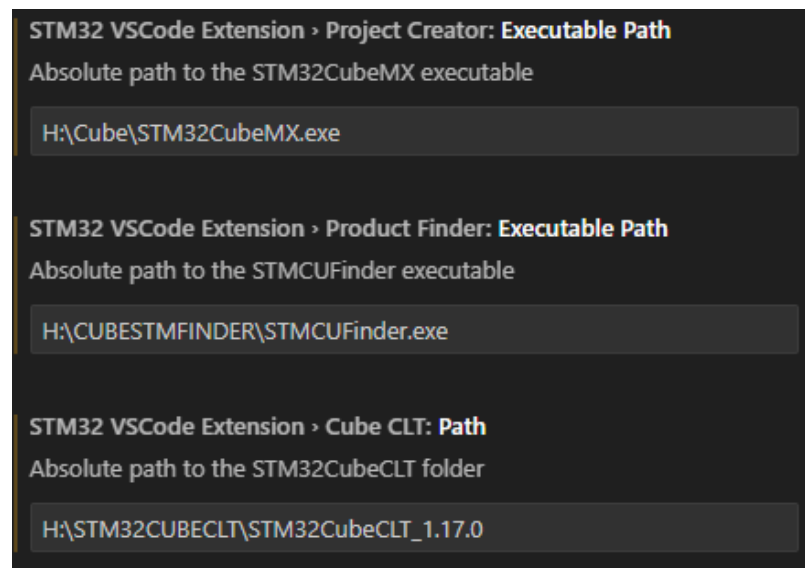


Рисунок 3.7 – Вибір програмних залежностей

Розглянемо налаштування застосунка Keil uVision5.

У Keil достатньо відкрити згенерований проєкт та почати вносити зміни, по закінченню він легко компілюється та надсилається на програматор. Із недоліків – не для усіх привабливий інтерфейс, місцями незручний.

Для відображення символів кирилиці у коментарях до коду необхідно відкрити пункт меню «Edit», вибрати «Config» та у вкладці «Editor» вибрати значення Encoding – 1251.

Збирання проєкту виконується за натисканням клавіші F7, завантаження команд до кристалу – F8, початок та завершення процедури налагодження за допомогою комбінації Ctrl+F5 (рис. 3.8).

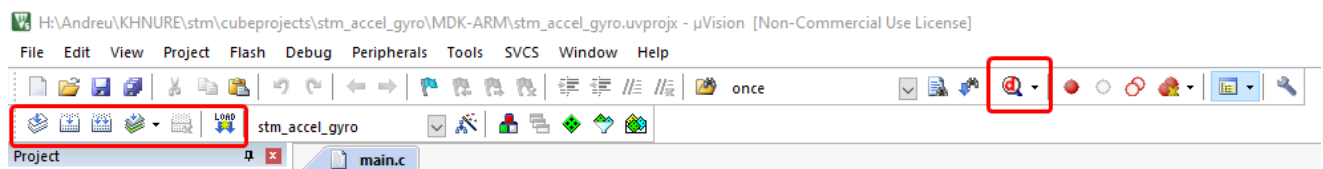


Рисунок 3.8 – Інтерфейс компіляції та налагодження

Також, час від часу оновлюються версії компілятора і при першій компіляції може з'явитись повідомлення щодо припинення його підтримки.

Для зміни компілятора треба перейти до «Project», вибрати «Options for target» і у вкладці «Target» змінити версію «ARM Compiler».

Розглянемо процес компіляції у ОС Linux.

У Unix-подібних операційних системах також можна компілювати проєкт, для цього необхідно встановити власне компілятор командами:

```
sudo apt-get install gcc-arm-none-eabi
sudo apt-get install stm32flash
```

Проєкт має містити MAKE-файл який компілюється командою «make».

Після отримання .hex файлу – запрограмувати контроллер:

```
stm32flash -w file.hex -v -g 0x0 /dev/ttyUSB0
```

3.3 Тестування коректності роботи прототипа

Далі необхідно зібрати апаратну частину – прикріпити двигуни до карбонової основи, приєднати регулятори обертів (рис. 3.9) та провести від них лінії керуючих сигналів і живлення контролерів.

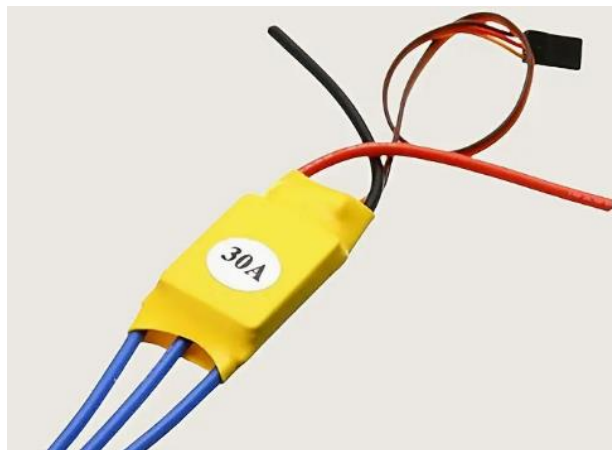


Рисунок 3.9 – Драйвер для безщіткового двигуна

На драйвери обертів подаватиметься велика напруга, а значний струм на кожному двигуні буде різним, відповідно до необхідної швидкості в кожен момент часу. Якщо такі коливання споживання струму будуть досить частими, то вони заважатимуть іншим драйверам та навіть контролерам, які від драйверів заживлюються. Це може спричинити багато проблем: від

перегріву до різкого зниження напруги та виведення з ладу контролера обертів і погіршення характеристик акумулятора. Для запобігання цього рекомендують знизити частоту оновлення швидкості моторів. Проте, якщо це з певних причин неприпустимо, достатньо встановити у точці з'єднання силових проводів низькочастотний фільтр, або принаймні конденсатор чи декілька, сумарним номіналом від 200 до 1000 мікрофарад.

Оскільки частота оновлення швидкості двигунів критична переважно для компактних пристроїв, котрим необхідна велика точність рухів – для пристроїв з великим корпусом доцільно усувати проблему програмно.

Перед запуском усі сигнальні і силові лінії слід обережно розвести, використовуючи ізольований провід або провідники з шин. Особливу увагу буде приділено фільтрації живлення [10], та захисту сигнальних ліній від перешкод [11].

Механічна частина виконує функції опори та забезпечує стабільне розміщення усіх ключових елементів. Основу конструкції становить хрестоподібний корпус, до країв якого буде закріплено двигуни. Драйвери для них будуть розміщені на балках між мотором та серцевиною корпусу. У середині каркасу розміститься плата з контролерами, радіоприймач та вузол живлення. Акумулятор кріпитиметься під корпусом на стропи.

Корпус виготовлений з легкого, але міцного матеріалу – карбону, центральний блок складається з двох пластин та латунних стійок між ними, для захисту електроніки зверху та знизу.

Після збирання обох частин виконується перевірка живлення, правильності полярності. Перед подачею живлення необхідно здійснити перевірку мультиметром на відсутність коротких замикань.

Опісля програмування мікроконтролера виконано контрольну перевірку кріплень пристрою до основи і з готовим пристроєм (рис. 3.10) можна переміститись до тестового майданчику.



Рисунок 3.10 – Зібраний пристрій

Для безпечного запуску механізму, перший раз бажано робити це на відкритому просторі, також можна доробити стійки із проволочки (рис. 3.11) аби корпус не торкався землі.



Рисунок 3.11 – Пристрій на додатковій опорі

Зазвичай гвинти намагаються віддалити від трави та землі, аби при старті до лопастей не потрапило каміння або гілки. Для цього створюють тимчасові пускові майданчики або прикріплюють постійну армотизуючу стійку (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Тестування пристрою

Як видно на знімку (рис. 3.13), пристрій успішно здіймається у повітря при отриманні відповідного сигналу від апаратури.



Рисунок 3.13 – Успішний запуск

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було спроектовано та реалізовано пристрій на основі мікроконтролера STM32F1, що має широкий спектр можливостей для обробки даних з різних сенсорів. Основною метою проєкту було створення системи, яка отримує інформацію з датчиків акселерометра та гіроскопа, обробляє ці дані та вживає відповідних заходів для стабілізації об'єкта в умовах динамічних змін.

Пристрій аналізує дані, що надходять з акселерометра, який вимірює прискорення, та гіроскопа, що оцінює кутову швидкість. На основі цих показників система може визначити, чи є об'єкт у стані рівноваги. У разі виявлення відхилення від стабільного положення, пристрій реагує, змінюючи потужність роботи чотирьох двигунів. Двигуни активно працюють, стабілізуючи об'єкт, повертаючи його в рівноважний стан.

Однак, проєкт має потенціал для подальшого розвитку. Одним із напрямків удосконалення є зміна типу спостереження. Це може бути досягнуто шляхом додавання відеокамери та окремого відеоканалу або системи GPS. Це дозволить здійснювати навігацію та маневрування об'єкта не тримаючи його у полі зору, або навіть віддалено, підключивши радіоелементи до персонального комп'ютера.

У результаті, даний проєкт відкриває нові горизонти для досліджень у галузі робототехніки та автоматизації, пропонуючи цікаві можливості для подальших експериментів та вдосконалень за допомогою навіть недорогих компонентів, доступних як радіолюбителям так і початківцям.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Мірошник М. А., Клименко Л. А., Корольова Я. Ю. Технології та автоматизація проектування цифрових пристроїв складних комп'ютерних систем на ПЛІС: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 220 с.
2. Філяшкін М.К. Мікроелектромеханічні системи: навч. посіб. Київ: НАУ, 2019. 276 с.
3. Yiu J. The definitive guide to the ARM Cortex-M3. Newnes, 2009, 479 с.
4. STM32 Cortex-M4 MCUs and MPUs programming manual: технічний довід. посіб., 2020. 262 с. URL: https://www.st.com/resource/en/programming_manual/pm0214-stm32-cortexm4-mcus-and-mpus-programming-manual-stmicroelectronics.pdf (дата звернення: 10.05.2025).
5. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification PS-MPU-6000A-00 Revision 3.4: технічний довід. посіб., 2013. 52 с. URL: https://arduino.ua/docs/PS-MPU-6000A.pdf?srsltid=AfmBOopv_etezropBuM9VpwtGRcOG8nrAiR49Zr1KNY4Vd_dFZV00JZ (дата звернення: 25.05.2025).
6. Cortex-M3: технічний довід. посіб, 2008. 410 с. URL: https://www.keil.com/dd/docs/datashts/arm/cortex_m3/r2p0/ddi0337g_cortex_m3_r2p0_t rm.pdf (дата звернення: 10.05.2025).
7. Калачев О. Як я розробив квадрокоптер на ESP32 з нуля. Github. URL: <https://github.com/okalachev/flix> (дата звернення: 07.05.2025).
8. Програмуємо квадрокоптер на Arduino. HABR. URL: <https://habr.com/ru/articles/227425/> (дата звернення: 26.05.2025)
9. RM0368 Reference manual: технічний довід. посіб., 2018. 852 с. URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0368-stm32f401xbc-and-stm32f401xde-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf (дата звернення: 22.05.2025).
10. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування: підручник. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. 250с.
11. Філяшкін М.К., Василенко М.П., Мухіна М.П., Синеглазов В.М. Дослідження мікроелектромеханічних системю: метод. вказівки. Київ: Національний авіаційний університет, 2020, 116 с.