

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

кафедра РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

“На правах рукопису”

УДК 621.396.9

“До захисту допущено”

Завідувач кафедри РТС



Сергій ЖУК

“ 10 ” 12 202__ р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
“Радіотехнічні комп’ютеризовані системи”
зі спеціальності 172 **“Електронні комунікації та радіотехніка”**
на тему: «Пристрій радіокерування бпла на основі мікроконтролера»

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи РС-31 мп

Калюта Дмитро Петрович

(прізвище, ім’я, по батькові)



(підпис)

Науковий керівник: доцент каф. радіотехнічних систем

к.т.н., доц., Катін Павло Юрійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім’я, по батькові)



(підпис)

Рецензент: доцент каф. обчислювальної техніки, доцент, к.т.н.

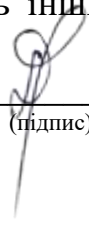
Волокіта Артем Миколайович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім’я, по батькові)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____



(підпис)

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

СМЧ Сергій ЖУК

« 20 » 09 _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Калюті Дмитру Петровичу

1. Тема дисертації «Пристрій радіокерування бпла на основі мікроконтролера», науковий керівник дисертації Катін Павло Юрійович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «8» ____ 11 ____ 2024 р. №5023-с
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2024
3. Об'єкт дослідження: пристой та процеси радіокерування БПЛА.
4. Предмет дослідження є методи та алгоритми публічної автентифікації абонентів IP телефонії на основі ланцюжків блоків транзакцій (блокчейн).
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Проаналізувати сучасні системи радіокерування БПЛА на основі мікроконтролерів. Розробити структурні та функціональні схеми передавача і приймача. Розробити алгоритми керування радіозв'язком. Реалізувати систему радіокерування БПЛА та створити інструкцію користувача. Дослідити можливості вдосконалення пристрою та алгоритмів.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу презентація PowerPoint у вигляді слайдів
7. Орієнтовний перелік публікацій _____

9. Дата видачі завдання 20.09.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз існуючих рішень	20.09 – 30.09	
2	Розробка структурної схеми передавача та приймача	01.10 – 10.10	
3	Розробка функціональної схеми передавача та приймача	11.10 – 20.10	
4	Розробка алгоритмів роботи передавача і приймача	11.10 – 20.10	
5	Реалізація системи радіокерування БПЛА	01.11 – 20.11	
6	Дослідження можливостей поліпшення параметрів пристрою та вдосконалення алгоритмів	21.11 – 01.12	

Студент

Дмитро КАЛЮТА

Науковий керівник

Павло КАТІН



РЕФЕРАТ

Текстова частина дисертаційної роботи містить: 110 с., 27 рис., 3 табл., 19 джерел.

Метою дослідження є створення пристрою радіокерування безпілотним літальним апаратом (БПЛА) на основі мікроконтролера, який забезпечує стабільний зв'язок та ефективне управління в реальних умовах експлуатації.

Об'єкт дослідження – пристрої та процеси радіокерування БПЛА.

Предмет дослідження – методи та алгоритми, які забезпечують функціонування систем радіокерування на основі мікроконтролера.

Ключові слова: БПЛА, радіокерування, мікроконтролер, алгоритми керування, стабільність зв'язку, NRF-24, телеметрія.

Робота присвячена аналізу існуючих систем керування БПЛА, розробці структурної та функціональної схем передавача і приймача, створенню алгоритмів керування радіозв'язком, розробці програмного забезпечення для керування, тестуванню розробленої системи та її вдосконаленню.

У роботі розглянуто сучасні виклики у радіокеруванні БПЛА, включаючи складні умови експлуатації, перешкоди в ефірі, оптимізацію енергоспоживання та забезпечення надійності системи. Проведено порівняльний аналіз існуючих технічних рішень у сфері радіозв'язку, зокрема використання протоколів SBUS, CRSF та цифрових модулів на базі NRF-24 і LoRa.

Результати дослідження включають:

- розробку прототипу пристрою радіокерування;
- структурну інтеграцію функціональних елементів;
- тестування стабільності зв'язку на середніх і великих відстанях;
- рекомендації щодо подальшого вдосконалення системи.

Робота спрямована на розробку доступних і надійних рішень для керування БПЛА, які забезпечують стабільний зв'язок та відповідають потребам різних сфер застосування.

ABSTRACT

The textual part of the dissertation consists of 110 pages, 27 figures, 3 table, and 19 references.

Objective of the study: to develop a radio control device for unmanned aerial vehicles (UAVs) based on a microcontroller, ensuring stable communication and effective control in real-world operating conditions.

Object of the study: devices and processes for radio control of UAVs.

Subject of the study: methods and algorithms ensuring the functioning of microcontroller-based radio control systems.

Keywords: UAV, radio control, microcontroller, control algorithms, communication stability, NRF-24, telemetry.

The study focuses on analyzing existing UAV control systems, developing structural and functional schemes for the transmitter and receiver, creating radio communication control algorithms, developing control software, testing the designed system, and its further improvement.

The work examines contemporary challenges in UAV radio control, including complex operating conditions, signal interference, energy efficiency optimization, and system reliability. A comparative analysis of existing technical solutions in radio communication is conducted, particularly focusing on SBUS, CRSF protocols, and digital modules based on NRF-24 and LoRa.

The results of the study include:

- development of a prototype radio control device;
- structural integration of functional elements;
- testing communication stability over medium and long distances;
- recommendations for further system enhancement.

The study aims to develop affordable and reliable solutions for UAV control, providing stable communication and meeting the requirements of various application fields.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	10
1.1. Еволюція, принципи та сучасні технології керування БПЛА	10
1.2. Роль польотних контролерів у системах керування БПЛА	14
1.3. Аналіз систем передачі відео	17
1.4. Системи радіозв'язку	22
1.5. Програмні рішення для керування БПЛА	34
1.6. Особливості використання операційних систем реального часу у мікроконтролерах	45
1.7. Висновки до розділу	47
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ РАДІОКЕРУВАННЯ БПЛА НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА	48
2.1. Структурна схема передавача	48
2.2. Структурна схема приймача	58
2.3. Висновки до розділу	68
3 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ РАДІОКЕРУВАННЯ БПЛА НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА	70
3.1. Розробка функціональної схеми передавача	70
3.2. Функціональна схема приймача	74
3.3. Висновки до розділу	77
4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ	78
4.1. Розробка алгоритмів передавача	78
4.2. Розробка алгоритмів приймача	86
4.3. Висновки до розділу	92
5 ОПИС МАКЕТУ ТА ТЕСТУВАННЯ ПРИСТРОЮ РАДІОКЕРУВАННЯ БПЛА НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА	93
5.1. Обґрунтування вибору компонентів пристрою	93
5.2. Побудова макетів передавача і приймача	107
5.3. Тестування макету пристрою радіокерування бпла на основі мікроконтролера	110
5.4 Висновки до розділу	118
ВИСНОВКИ	119

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

СК – система керування

СРК – система радіокерування

GPS – глобальна система позиціювання

FPV – керування від першої особи (First Person View)

ПК – пульт керування

ПКР – польотний контролер

ШІ – штучний інтелект

SBUS – серійний шинний протокол (Serial Bus)

CRSF – протокол Crossfire

RTL – повернення до точки запуску (Return to Launch)

ШИМ – широтно-імпульсна модуляція

LoRa – довгий радіус дії (Long Range)

NRF-24 – бездротовий модуль зв'язку NRF-24

TBS – Team BlackSheep

OpenTX – операційне програмне забезпечення для радіоуправління

ВСТУП

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали невід'ємною складовою багатьох сфер, таких як моніторинг, логістика, сільське господарство, наука та оборона. Їх застосування дозволяє значно підвищити ефективність завдяки автоматизації процесів та доступу до важкодоступних територій. Водночас однією з ключових умов успішного функціонування БПЛА є надійні та стабільні системи керування, які забезпечують безпечний і безперебійний зв'язок між оператором і апаратом.

На сьогодні існує гостра потреба у створенні простих, економічно доступних рішень для радіокерування, які можуть забезпечувати надійну роботу на достатній відстані. Сучасні виклики, такі як складні умови експлуатації, велика кількість перешкод і необхідність підтримання стабільного зв'язку на середніх і великих дистанціях, вимагають розробки нових, адаптивних підходів до побудови систем керування.

Метою дослідження є створення компактної та економічно вигідної системи радіокерування (СРК) для БПЛА, яка забезпечує стабільний зв'язок на оптимальній відстані, відповідає сучасним технічним вимогам та легко інтегрується у вже існуючі або нові платформи.

Об'єкт дослідження – системи радіокерування для безпілотних літальних апаратів.

Предмет дослідження – методи та алгоритми, які забезпечують стабільне функціонування простих і доступних систем керування БПЛА.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Провести аналіз існуючих систем керування БПЛА, визначити їх переваги та недоліки.
- Розробити структурну та функціональну схеми системи радіокерування.
- Розробити алгоритми для передавача і приймача.
- Реалізувати програмне забезпечення системи та протестувати її.
- Провести тестування розробленої системи та надати рекомендації щодо її вдосконалення.

Дослідження спрямоване на вирішення актуального завдання розробки простих, доступних та надійних рішень для керування БПЛА, які забезпечують стабільний зв'язок і відповідають потребам різних сфер, де важливі оперативність, точність і економічність.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

БПЛА займають важливе місце у сучасних технологіях, виконуючи широкий спектр завдань. Згідно з даними, найбільшу частку задач (не враховуючи військового застосування) для БПЛА становлять моніторинг та інспекція, що охоплюють близько 40% усіх операцій. До них належать спостереження за інфраструктурою та збирання даних. Пошуково-рятувальні операції складають 25% задач, допомагаючи в надзвичайних ситуаціях, тоді як доставка вантажів займає 15% і використовується для транспортування малих вантажів. Решта 20% задач належать до категорії "Інше", яка включає інфраструктурні дослідження, картографування, 3D-моделювання та агропромислові завдання (рисунк 1)[1].

Розуміння цих ключових сфер застосування дозволяє оцінити еволюцію та значення БПЛА у сучасному світі, що стає основою для подальшого розвитку технологій управління цими апаратами.

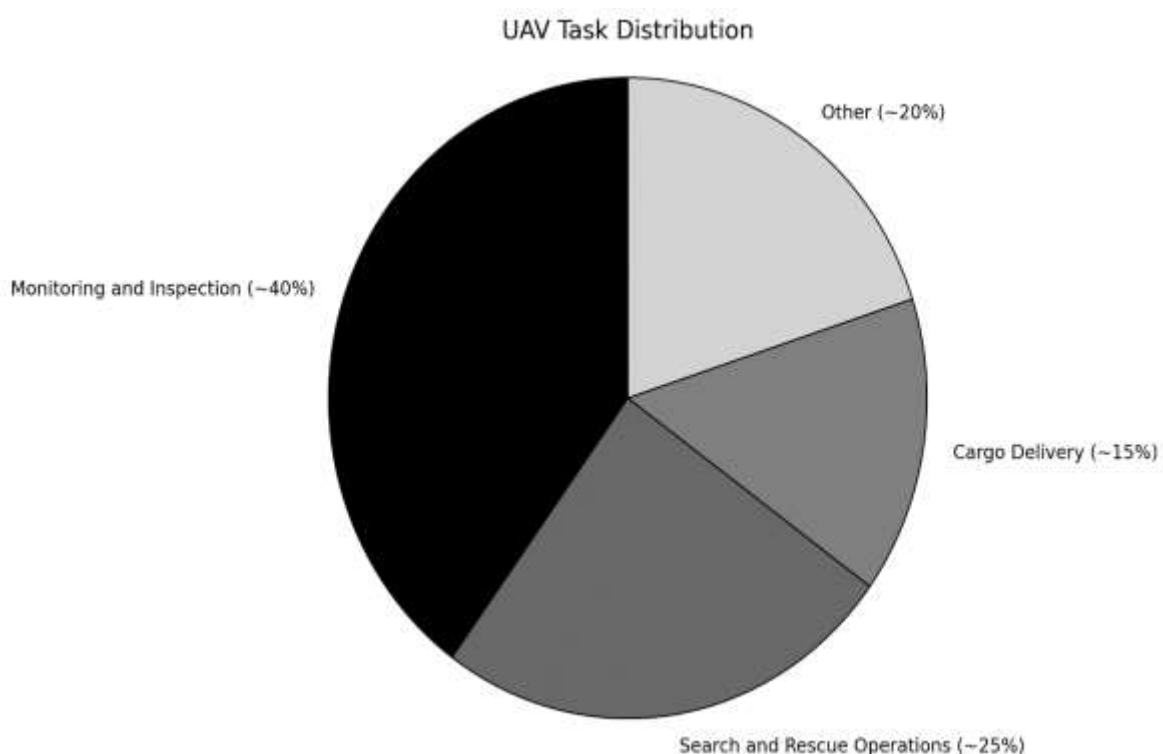


Рисунок 1 – Спектр завдань які виконують БПЛА

1.1. Еволюція, принципи та сучасні технології керування БПЛА

Історія БПЛА розпочалася на початку XX століття, коли з'явилися перші автоматизовані літальні пристрої. У 1916 році британський інженер Арчібальд

Лоу створив перший прототип БПЛА, відомий як "Aerial Target"(Рис. 1). Цей апарат використовувався для військових цілей і тестування нових СК. Хоча він не досяг широкого успіху, цей проєкт заклав основу для подальших розробок.



Рисунок 2 – Прототип БПЛА «Aerial Target»

Під час Першої та Другої світових воєн розвиток БПЛА значно прискорився. Німецький "V-1", показаний на рис. 2, став першим масово використовуваним БПЛА для доставки боєзарядів на значні[2] відстані. Хоча його точність була низькою, це продемонструвало потенціал БПЛА у військовій сфері. У цей час також почали впроваджувати автоматичні системи навігації, що дозволяли апаратам здійснювати польоти без прямої участі оператора.

У період холодної війни інтерес до БПЛА зріс. У 1950–60-х роках з'явилися перші розвідувальні БПЛА, такі як американський "Ryan Firebee", які використовувалися для збору даних у небезпечних для пілотованих літаків районах. Удосконалення радіотехніки та систем навігації зробило їх надійнішими та функціональнішими, перетворивши на важливий інструмент військових операцій і стимул для розвитку аерокосмічної промисловості.



Рисунок 3 – БПЛА «V-1»,



Рисунок 4 – БПЛА «Ryan Firebee»

З кінця XX століття, з розвитком мікроелектроніки та GPS-технологій, БПЛА почали активно використовуватися у цивільному секторі. У 1990-х роках з'явилися перші комерційні моделі, здатні виконувати задачі спостереження, моніторингу інфраструктури та сільськогосподарських угідь. Моделі стали компактнішими, точнішими та більш доступними, що дозволило розширити сферу їх застосування.

У XXI столітті інновації у мікроконтролерах, системах зв'язку та штучному інтелекті (ШІ) спричинили справжню революцію у сфері БПЛА. З'явилися БПЛА з функціями автоматичної стабілізації, обробки відеосигналів у реальному часі та навіть автономного ухвалення рішень. Технологія FPV (First Person View) забезпечила можливість керування апаратом у реальному часі, що зробило БПЛА незамінними для пошуково-рятувальних операцій, змагань і професійного використання. Військові БПЛА, такі як "MQ-9 Reaper", показаний на Рис. 4 здатні виконувати розвідувальні місії та завдавати точкових ударів, стали ключовими елементами сучасної стратегії[3].



Рисунок 5 – Сучасний БПЛА «MQ-9 Reaper»

Сьогодні БПЛА охоплюють безліч напрямків: від доставки товарів і медицини до моніторингу навколишнього середовища та оборонних завдань. Завдяки доступності технологій 3D-друку, мікроконтролерів та високоефективних акумуляторів, розробка БПЛА стала простішою та доступнішою для широкого кола користувачів. Таким чином, БПЛА пройшли шлях від військових інструментів до універсальних платформ, здатних виконувати завдання будь-якої складності у різних галузях.

Керування БПЛА базується на передачі команд від оператора до апарата через системи радіозв'язку або супутникові канали. Ці системи забезпечують керування

положенням апарата в просторі, стабілізацію польоту та виконання завдань, таких як розвідка, моніторинг чи доставка вантажів. Основними принципами керування є використання аеродинамічних поверхонь, регулювання тяги двигуна та застосування програмованих алгоритмів стабілізації й керування.

Перші БПЛА керувалися за допомогою попередньо налаштованих траєкторій польоту або механічних СК. Наприклад, ранні моделі, такі як німецький "V-1", слідували фіксованому маршруту за рахунок механічних годинникових механізмів та гіроскопів.

Сучасні БПЛА використовують системи радіокерування, які забезпечують передачу команд від наземної станції до апарата. Пульти керування (ПК) або наземна станція зв'язується з бортовим приймачем, який передає команди до польотного контролера (ПКР). ПКР обробляє ці дані та керує роботою двигунів, сервоприводів і додаткових бортових систем. Для забезпечення стабільності використовуються гіроскопи, акселерометри та магнітометри, які дозволяють апарату утримувати заданий курс, висоту та орієнтацію.

Керування БПЛА може здійснюватися у двох основних режимах:

- **Ручне керування :** Оператор контролює всі аспекти польоту за допомогою пульта дистанційного керування або наземної станції. Цей режим застосовується для виконання складних маневрів або при польотах у важких умовах.
- **Автономне керування:** БПЛА слідує заздалегідь запрограмованій траєкторії, виконуючи команди без безпосередньої участі оператора. Такий режим використовує системи автопілота, що дозволяють апарату працювати за координатами GPS або виконувати місії на основі алгоритмів ШІ.

Системи передачі команд можуть бути як аналоговими, так і цифровими. Аналогові системи, що використовувалися раніше, забезпечували передачу команд через амплітудну або частотну модуляцію сигналу. Сучасні цифрові системи, такі як протоколи SBUS, CRSF чи DSMX, забезпечують вищу точність і захищеність даних від перешкод.

Крім основного керування, БПЛА оснащуються системами зворотного зв'язку, такими як FPV-камери та телеметричні модулі. Вони дозволяють

оператору отримувати інформацію про стан апарата, включаючи висоту, швидкість, заряд акумулятора та відеопотік у реальному часі. Це забезпечує високий рівень контролю над апаратом навіть у складних умовах.

Таким чином, керування БПЛА розвинулося від механічних систем до складних багаторівневих автоматизованих систем, які забезпечують високу точність, надійність та гнучкість у виконанні завдань. Завдяки цьому сучасні БПЛА здатні виконувати як прості, так і надзвичайно складні місії, задовольняючи потреби в різних галузях.

1.2. Роль польотних контролерів у системах керування БПЛА

ПКР є центральним елементом сучасних СК БПЛА. Його основна функція обробляти дані з бортових датчиків, таких як гіроскопи, акселерометри, GPS та барометри, для забезпечення стабільного та керованого польоту. Завдяки цьому ПКР може компенсувати вплив зовнішніх факторів, наприклад, поривів вітру чи нестабільності апарата в польоті.

Серед важливих функцій польотного контролера можна виділити автоматичну стабілізацію, яка дозволяє літальному апарату утримувати задану траєкторію польоту. ПКР обробляє команди оператора, передані через ПК, та переводить їх у відповідні рухи керуючих поверхонь або двигунів, забезпечуючи виконання необхідних маневрів.

ПКР також підтримують різні режими польоту, такі як стабілізований режим, утримання висоти чи автоматичне повернення до точки запуску (RTL). Це дає можливість оператору вибирати найбільш зручний рівень контролю залежно від завдань, що виконуються.

Огляд популярних польотних контролерів:

Pixhawk універсальна платформа(рис. 5), відома своєю надійністю та підтримкою широкого спектра датчиків і периферійних пристроїв. Базуючись на процесорі ARM Cortex-M4, цей контролер забезпечує виконання складних алгоритмів управління, що робить його придатним для професійних та аматорських проектів[7].



Рисунок 6 – ПКР Pixhawk

Ardupilot апаратна платформа, відома своєю адаптивністю для різних типів безпілотників, включаючи літаки, гелі-, квадро-, гексакоптери та наземні роботи. Польотний контролер показаний на рис. 6. Контролери на базі Ardupilot зазвичай оснащені мікроконтролерами STM32, які гарантують стабільну роботу та швидку обробку даних.

Betaflight контролери, орієнтовані на швидкість і точність керування, є популярним вибором для гоночних коптерів, рис. 7. Вони компактні, легкі та зазвичай обладнані процесорами STM32F4/F7, що дозволяє забезпечити швидку реакцію на команди оператора.



Рисунок 7, 8 – ПКР «Ardupilot» зліва, та «Betaflight» справа

Holybro Durandal належить до високопродуктивних польотних контролерів, створених для великих або професійних дронів. Показаний на рис. 7. Завдяки процесору Н7 і резервним системам цей контролер забезпечує високу надійність у критично важливих завданнях.



Рисунок 9 – ПКР «Holybro Durandal»

Ці апаратні рішення забезпечують широкий функціонал, необхідний для реалізації як базових, так і складних завдань у сфері керування БПЛА. Польотні контролери підтримують роботу з датчиками, стабілізують апарат у польоті, виконують автономні місії та забезпечують високу точність управління. Вибір контролера залежить від специфіки проекту, таких як розмір та складність БПЛА, тип місії, умови експлуатації та технічні вимоги. Наприклад, платформи, як-от Pixhawk чи Holybro Durandal, чудово підходять для професійних проектів, тоді як Betaflight найчастіше використовуються для високошвидкісних перегонів.

Однак значна багатофункціональність таких контролерів часто супроводжується високою вартістю, що є одним із головних їхніх недоліків. Польотні контролери, особливо професійні моделі, такі як Pixhawk або Holybro Durandal, можуть коштувати сотні доларів. Це суттєво впливає на загальну вартість проекту, особливо коли потрібна інтеграція додаткових компонентів, таких як GPS-модулі, телеметрія або FPV-системи. Для багатьох аматорів та розробників із обмеженим бюджетом це стає серйозною перешкодою у виборі таких систем.

Крім того, висока вартість контролерів нерідко обумовлена використанням дорогих компонентів і складністю виробництва. Наприклад, у професійних контролерах застосовуються потужні мікроконтролери, такі як ARM Cortex-M4 чи Н7, які самі по собі значно дорожчі за базові мікросхеми, використовувані в простіших системах. Додатково до цього, такі контролери потребують точного

налаштування і часто включають спеціалізоване програмне забезпечення, яке може вимагати оплати ліцензії або високого рівня технічної експертизи для використання.

Ще одним важливим аспектом є вартість обслуговування та заміни компонентів. У разі пошкодження контролера, що може статися під час аварії або через знос, вартість його ремонту або заміни може стати значною частиною бюджету. Це особливо актуально для проектів, які працюють у складних умовах або з великим навантаженням.

Попри це, польотні контролери залишаються незамінними в СК для складних БПЛА завдяки своїм можливостям. Вони пропонують функції стабілізації, підтримують складні місії, такі як автоматичне повернення до точки запуску (RTL) чи обхід перешкод, і можуть інтегруватися з широким спектром периферійних пристроїв.

1.3. Аналіз систем передачі відео

Системи передачі відео БПЛА, поділяються за різними критеріями, залежно від їхніх технічних характеристик, способу обробки сигналу та призначення. Основними класифікаційними ознаками є тип сигналу, роздільна здатність та функціональне призначення. Приклад такої системи показаний на рис. 8

За типом сигналу системи поділяють на аналогові і цифрові.

Аналогові системи передають відеосигнал у безперервній формі, використовуючи формати PAL, NTSC або SECAM. Основною перевагою є мінімальна затримка передачі (до 30 мс), що робить такі системи популярними для оперативного керування БПЛА. Аналогові системи мають низьку вартість і відносно високу стійкість до зовнішніх перешкод. Однак їхня якість обмежується стандартною роздільною здатністю (до 720×576 пікселів), що ускладнює використання в задачах, де потрібна висока деталізація.

Цифрові системи використовують алгоритми стиснення даних, наприклад, H.264 або H.265, і передають відео у вигляді цифрових пакетів через бездротові протоколи, такі як Wi-Fi, 4G/5G. Основною перевагою є висока якість зображення, яка може досягати Full HD (1920×1080) і навіть 4K. Однак затримка передачі

сигналу (100–300 мс) може обмежувати їхнє використання у задачах, які потребують миттєвої реакції оператора.



Рисунок 10 – Приклад FPV системи передачі відео

За роздільною здатністю системи бувають стандартної і високої чіткості.

Системи зі стандартною чіткістю (SD) переважно використовуються в аналогових системах передачі відео. Вони забезпечують базовий рівень деталізації, достатній для огляду загальних контурів місцевості або об'єктів, але не дозволяють виявляти дрібні деталі.

Системи з високою чіткістю (HD) передачі відео підтримують роздільну здатність від 1280×720 до 1920×1080 пікселів, що забезпечує значно кращу деталізацію. Ультрависока чіткість (4K) дозволяє отримати зображення з максимальною деталізацією, яке використовується в професійних задачах, таких як кінозйомка або розвідувальні операції. Основним обмеженням таких систем є висока вартість обладнання та вимоги до пропускної здатності каналу передачі.

За призначенням системи передачі відео поділяються на:

Системи реального часу (FPV-системи)

FPV-системи (First Person View) використовуються для передачі відео в реальному часі, що дозволяє оператору керувати БПЛА, спостерігаючи за навколишнім середовищем через камеру на борту. Вони зазвичай базуються на аналогових або низькозатримкових цифрових системах, де мінімальна затримка сигналу є критично важливою для точного керування.

Системи запису та зберігання

Ці системи забезпечують збереження відео на бортових накопичувачах або передавання його на наземні сервери для подальшого аналізу. Вони зазвичай використовують цифрові технології для забезпечення високої якості запису. Затримка передачі не є критичною, але важливою є стабільність зв'язку та надійність збереження даних.

Кожен тип систем передачі відео має свої переваги і недоліки, що визначають доцільність їхнього використання у конкретних задачах. Аналогові системи залишаються популярними для керування в реальному часі завдяки низькій затримці, тоді як цифрові та HD-системи краще підходять для завдань, що вимагають високої якості зображення та подальшого аналізу даних. Вибір конкретної системи залежить від поставлених цілей, технічних вимог та бюджету проекту.

Можливості використання FPV-систем для керування БПЛА

FPV-системи дозволяють оператору керувати безпілотним літальним апаратом, орієнтуючись на відео з бортової камери, передане в реальному часі. Ця технологія створює ефект присутності, дозволяючи бачити політ «очима» БПЛА, що значно розширює можливості використання дрона у складних умовах.

Основними перевагами FPV-систем для керування БПЛА є:

1. Підвищення точності управління. FPV-системи забезпечують чітке уявлення про оточення в реальному часі, що спрощує виконання складних маневрів, особливо у вузьких просторах або важкодоступних зонах.
2. Розширення діапазону задач. Використання FPV дозволяє БПЛА ефективно виконувати завдання у таких сферах, як моніторинг сільськогосподарських угідь, інфраструктури, пошуково-рятувальні операції або спортивні змагання.
3. Мінімізація ризиків. Віддалене управління через FPV дозволяє оператору залишатися на безпечній відстані під час виконання завдань у небезпечних зонах, наприклад, у місцях аварій чи в умовах хімічного зараження.

Попри численні переваги, FPV-системи мають певні обмеження, які суттєво впливають на їхнє використання у практичних завданнях. Аналогові системи, завдяки своїй простоті й доступності, залишаються популярними, однак їхня низька роздільна здатність створює труднощі при виконанні завдань, де важлива

висока якість зображення. Це обмеження особливо відчутне в умовах складного рельєфу чи при виконанні точних операцій, коли деталі навколишнього середовища потребують чіткого зображення для коректного виконання задачі.

Цифрові FPV-системи, які забезпечують значно кращу якість відеопотоку, мають свої особливості, що впливають на їхню ефективність. Основною проблемою є висока затримка сигналу, яка може ускладнити керування апаратом у режимі реального часу. Затримка сигналу створює ризик неправильного оцінювання ситуації оператором, що може призвести до помилок під час польоту або виконання складних маневрів. Також цифрові системи дуже чутливі до електромагнітних завад, що може впливати на стабільність сигналу, особливо в умовах міського середовища або при використанні в складній місцевості.

Ще одним важливим аспектом є високе енергоспоживання цифрових FPV-систем. Ці системи потребують значних ресурсів для обробки відеосигналу та передачі його в реальному часі. Для багатьох безпілотників це означає скорочення тривалості польоту, адже батареї, які використовуються для роботи FPV-обладнання, могли б бути спрямовані на інші компоненти, наприклад, двигуни чи датчики. Це особливо актуально для малих дронів, де енергоефективність є критично важливим фактором.

Крім технічних обмежень, важливим аспектом є вартість сучасних цифрових FPV-систем. У порівнянні з аналоговими, цифрові системи є значно дорожчими, оскільки вимагають високотехнологічного обладнання, такого як передавачі, приймачі та дисплеї з високою роздільною здатністю. Це може стати стримуючим фактором для багатьох проектів, особливо для невеликих організацій чи аматорських користувачів, які працюють з обмеженим бюджетом.

Таким чином, попри всі свої переваги, FPV-системи мають низку важливих обмежень, зокрема низьку роздільну здатність в аналогових версіях, затримку сигналу, високу чутливість до завад, значне енергоспоживання та високу вартість цифрових варіантів. Вибір FPV-системи для використання у безпілотнику потребує зваженого підходу, враховуючи всі ці фактори та вимоги до конкретного завдання.

Роль мікроконтролерів у відеоперетворенні

Мікроконтролери відіграють ключову роль у сучасних системах відеоперетворення БПЛА. Завдяки своїй гнучкості та компактності, вони забезпечують ефективну обробку відеосигналів у режимі реального часу, виконуючи функції стиснення, конвертації та передачі даних через бездротові канали.

Основні функції мікроконтролерів у відеоперетворенні:

1. Стиснення та оптимізація відеосигналу.

Мікроконтролери виконують функції стиснення відеоданих для зменшення обсягу інформації, що передається, без значної втрати якості. Це особливо важливо для роботи з бездротовими каналами передачі, де пропускна здатність обмежена. Використання алгоритмів стиснення, таких як H.264 чи H.265, дозволяє зменшити затримку передачі відео та оптимізувати його якість.

2. Перетворення формату сигналу.

У багатьох системах мікроконтролери відповідають за перетворення відеосигналу з аналогового у цифровий або навпаки. Це забезпечує сумісність між різними компонентами системи, такими як камери, передавачі та приймачі.

3. Обробка сигналів у реальному часі.

Завдяки своїй високій обчислювальній потужності, сучасні мікроконтролери, такі як STM32, ESP3, здатні аналізувати відеосигнали, відфільтровувати шум та коригувати кольори. Це дозволяє отримати стабільний і якісний сигнал навіть у складних умовах, таких як низька освітленість чи високий рівень завад.

4. Керування передачею даних.

Мікроконтролери забезпечують організацію передачі відеоданих через бездротові канали. Вони керують модулями зв'язку, такими як Wi-Fi або радіочастотні передавачі, забезпечуючи синхронізацію і стабільність сигналу.

Мікроконтролери мають низку переваг у системах відеоперетворення. Вони компактні, енергоефективні та підтримують інтеграцію з широким спектром периферійних пристроїв, таких як камери, сенсори та передавачі. Крім того, програмованість мікроконтролерів дозволяє адаптувати їх до специфічних завдань, забезпечуючи високу гнучкість системи.

Попри численні переваги, мікроконтролери мають обмежену обчислювальну потужність у порівнянні зі спеціалізованими процесорами, такими як GPU або FPGA. Це може впливати на швидкість обробки великих обсягів відеоданих або знижувати якість стиснення при роботі з високою роздільною здатністю.

1.4. Системи радіозв'язку

СРК для керування БПЛА працюють у різних частотних діапазонах, залежно від технічних вимог, умов експлуатації та нормативних обмежень у регіоні. Вибір частоти визначає такі характеристики, як стабільність зв'язку, дальність і чутливість до перешкод. Обираючи частоту, необхідно враховувати нормативні обмеження, умови експлуатації та технічні вимоги, що забезпечить надійний зв'язок і стабільну роботу системи.

Основні частотні діапазони

Частотні діапазони, що використовуються в СРК БПЛА, мають свої особливості, переваги та обмеження. Вибір частоти визначає такі ключові аспекти, як дальність зв'язку, стійкість до перешкод і специфіка виконуваних завдань. Нижче наведено огляд основних частотних діапазонів, які найчастіше використовуються у радіокеруванні та передачі даних.

Розглянемо основні частотні діапазони та їхні особливості:

- **2.4 ГГц** найбільш поширений діапазон для систем радіокерування. 2.4 ГГц популярний завдяки своїй доступності та сумісності з більшістю пристроїв без необхідності ліцензування у більшості країн. Цей діапазон забезпечує стабільний сигнал на середніх відстанях, але може бути схильний до перешкод через завантаженість ефіру (Wi-Fi, Bluetooth, інші пристрої).
- **5.8 ГГц** використовується як для радіокерування, так і для передачі відео. Основними перевагами є менша завантаженість порівняно з 2.4 ГГц і вища пропускна здатність. Проте стабільність сигналу може знижуватися у складних умовах, наприклад, при значних фізичних перешкодах.
- **433 МГц** цей діапазон популярний серед професійних користувачів для великих дистанцій. Завдяки нижчій частоті забезпечується значна дальність

зв'язку та стійкість у складних умовах. Однак у деяких країнах використання 433 МГц вимагає ліцензування, що може обмежувати його застосування.

- **868/915 МГц** частоти 868 МГц (Європа) і 915 МГц (Північна Америка) широко застосовуються для задач радіокерування та телеметрії. Вони забезпечують стабільний зв'язок на значних відстанях і є менш схильними до перешкод у порівнянні з 2.4 ГГц.
- **1.2/1.3 ГГц** зазвичай використовується у спеціалізованих системах, зокрема для передачі відео, але також може застосовуватися для радіокерування. Цей діапазон забезпечує добру стабільність сигналу і використовується переважно в професійних задачах.

Вибір частотного діапазону для систем радіозв'язку БПЛА є важливим аспектом, що визначає ефективність і надійність роботи всієї системи. Цей вибір залежить від кількох ключових факторів, які включають дальність зв'язку, стійкість до перешкод і завдання, що виконуються системою.

Дальність зв'язку є одним із визначальних факторів при виборі частоти. Для великих відстаней зазвичай обирають нижчі частоти, такі як 433 МГц або 868/915 МГц. Ці частотні діапазони забезпечують високу проникність сигналу крізь фізичні перешкоди, що робить їх оптимальними для використання в умовах, де важливо підтримувати стабільний зв'язок на значній відстані, наприклад, у складній місцевості або при польотах на далекі відстані.

Стійкість до перешкод також відіграє важливу роль, особливо в місцях із високою завантаженістю ефіру. У таких умовах частоти, які менше використовуються іншими пристроями, мають значні переваги. Наприклад, діапазон 5.8 ГГц часто обирають через його меншу завантаженість у порівнянні з 2.4 ГГц, що робить його придатним для передачі відеосигналів у реальному часі. Однак цей діапазон має обмеження у вигляді меншої дальності дії та чутливості до фізичних перешкод, таких як стіни чи густий ліс.

Завдання системи також визначають вибір частоти. Для передачі телеметрії, де важливими є стабільність сигналу та його точність, часто використовуються частоти, такі як 433 МГц. Вони забезпечують надійний зв'язок, навіть якщо апарат працює на великих висотах або в умовах, де є значні електромагнітні завади.

Натомість для передачі відео, де пріоритетом є висока пропускна здатність, перевага надається діапазону 5.8 ГГц, який дозволяє передавати відеопотік у високій якості з мінімальними затримками.

Крім технічних аспектів, вибір частоти залежить і від нормативних обмежень у конкретному регіоні. Наприклад, діапазони 433 МГц або 868/915 МГц можуть вимагати спеціальних дозволів чи ліцензування, залежно від законодавства. Це створює додаткові виклики для розробників і операторів, які планують використовувати ці частоти.

Таким чином, вибір частотного діапазону є складним процесом, який потребує врахування багатьох параметрів. Він визначає не лише технічну ефективність системи, але й її відповідність умовам експлуатації та регуляторним вимогам. Правильний вибір частоти дозволяє забезпечити стабільний зв'язок, оптимізувати енергоспоживання та підвищити загальну ефективність роботи БПЛА.

Модулі передачі сигналу

Модулі передачі сигналу є важливою складовою частиною систем радіокерування для безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Вони забезпечують двосторонній зв'язок між оператором та безпілотником, передаючи команди управління, телеметрію або відео. Існує кілька основних типів модулів, кожен з яких має свої особливості щодо частотного діапазону, дальності зв'язку, швидкості передачі даних та інших характеристик.

Розглянемо основні модулі передачі сигналу їх особливості та основні характеристики:

NRF24L01 — це один із найпоширеніших модулів для радіокерування, що працює у діапазоні 2.4 ГГц. Показаний на рис Завдяки своїй низькій вартості та компактним розмірам, він використовується у багатьох бюджетних рішеннях. Він підтримує досить хорошу стабільність зв'язку на коротких дистанціях, але для задач, що вимагають більшої дальності або пропускну здатності, може бути обмежений. Проте цей модуль добре підходить для простих систем радіокерування, де важлива економічність[14].



Рисунок 11 – Модулі типу **NRF24L01**

LoRa-модулі працюють на частотах 433 МГц, 868 МГц або 915 МГц і забезпечують значну дальність зв'язку — до 10-20 км у відкритих умовах. Завдяки технології LoRa ці модулі можуть ефективно передавати дані на великих відстанях, але вони мають обмежену швидкість передачі даних (до кількох кілобіт на секунду). Це робить їх відмінним вибором для передачі телеметрії та малих обсягів даних, але менш підходящими для задач, що вимагають високої пропускної здатності, таких як передача відео[6].

XBee-модулі забезпечують стабільний зв'язок на відстані до 2 км, працюючи в діапазонах 2.4 ГГц і 900 МГц. Вони популярні завдяки високій надійності і можливості інтеграції в сітчасті мережі, що дозволяє розширювати зону покриття, використовуючи кілька модулів. Однак вони мають високу вартість і більші енергозатрати, що робить їх менш підходящими для тривалих автономних польотів.



Рисунок 12 –14 – LoRa, XBee, FrSky модулі

R9 (FrSky) модулі** працюють у діапазоні 868/915 МГц і забезпечують стабільний зв'язок на великих відстанях (до 10 км), що робить їх популярними для професійних застосувань, таких як зйомки з великих висот або моніторинг територій. Проте цей модуль може бути чутливий до перешкод у складних радіоумовах, наприклад, в урбанізованих районах, де є велика кількість перешкод. Налаштування також потребує певних знань, оскільки для досягнення максимальної дальності необхідні додаткові коригування[10].

5.8 ГГц передавачі широко використовуються для передачі відео, зокрема в системах FPV. Вони забезпечують високу пропускну здатність, що дозволяє працювати з HD-сигналами. Однак ці модулі мають обмежену дальність через високочастотний характер сигналу, який зменшується при наявності перешкод або фізичних бар'єрів, таких як будівлі чи дерева. Це обмежує їх використання в умовах з високим рівнем перешкод.

TBS Crossfire (CRSF) працює на частотах 868/915 МГц і є одним із найпотужніших модулів для професійних користувачів, здатним забезпечити дальність зв'язку понад 30 км при низькій затримці. Завдяки технології Crossfire, цей модуль підтримує стабільний зв'язок навіть у складних умовах. Однак, через високу ціну та складність налаштування, він зазвичай використовується для специфічних завдань, де критична дальність зв'язку та надійність.

Ці модулі передачі сигналу мають свої переваги і недоліки, що робить їх більш або менш підходящими в залежності від вимог до завдань, таких як дальність, стабільність зв'язку, пропускну здатність та енергоспоживання[8].

Модулі передачі сигналу мають широкий спектр застосувань у системах радіокерування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), і їхній вибір залежить від конкретних завдань та умов експлуатації. Наприклад, модулі NRF24L01 добре підходять для короткодістанційних задач із базовими вимогами до зв'язку, тоді як LoRa-модулі забезпечують надзвичайну дальність, але мають низьку швидкість передачі, що обмежує їх використання для передачі великих обсягів даних. Для задач із великим радіусом дії або в складних умовах, таких як великі перешкоди чи висока густина радіосигналів, використовуються професійні рішення, наприклад,

TBS Crossfire, які забезпечують стабільність зв'язку навіть на відстанях понад 30 км.

Кожен із модулів має свою спеціалізацію. XBee-модулі та R9 (FrSky) є чудовими виборами для задач, що вимагають стабільного зв'язку на середніх і великих дистанціях, але вони коштують дорожче і потребують більш складного налаштування. Аналогічно, 5.8 ГГц передавачі, які часто застосовуються для передачі відео, забезпечують високу якість сигналу, але вимагають відносно відкритих умов експлуатації через чутливість до фізичних перешкод. Ці обмеження ставлять перед операторами необхідність детально оцінювати середовище роботи та специфіку завдань перед вибором обладнання[9].

Протоколи зв'язку

Протоколи зв'язку є фундаментальним елементом систем управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Вони визначають спосіб передачі команд між оператором і бортовою системою апарата, забезпечуючи синхронізацію та точність виконання польотних завдань. Протоколи регламентують формат і швидкість передачі даних, що дозволяє оптимізувати взаємодію між компонентами системи радіозв'язку.

У системах управління БПЛА протоколи зв'язку відповідають за передачу команд управління на бортові модулі, такі як сервоприводи, польотні контролери, а також за обмін даними телеметрії між літальним апаратом і наземною станцією. Їхня функціональність впливає на стабільність і швидкість реакції дрона під час польоту.

На сучасному етапі розвитку технологій використовується широкий спектр протоколів, адаптованих до різних типів апаратів і завдань. Вони охоплюють як базові рішення для передачі сигналів (наприклад, PWM), так і більш просунуті протоколи (SBUS, CRSF, DSMX, OpenTX), які забезпечують ефективну роботу навіть у складних умовах.

Ці протоколи різняться за своїми технічними характеристиками, такими як швидкість передачі даних, затримка сигналу, стійкість до перешкод і енергоспоживання. Їхнє впровадження значно підвищує ефективність систем управління БПЛА, дозволяючи адаптувати їх до специфіки кожного конкретного

проекту. У цьому підрозділі розглядаються основні протоколи зв'язку, їхні особливості та роль у забезпеченні ефективної роботи систем радіокерування.

Розглянемо основні протоколи передачі даних, їх принципи роботи, переваги та обмеження, а також сфери застосування:

Широтно-Імпульсна модуляція (ШІМ, англ. Pulse Width Modulation, PWM) — це один із найстаріших і найпоширеніших протоколів зв'язку, який використовується в СРК БПЛА. Завдяки простоті реалізації та широкій підтримці апаратними платформами, цей протокол залишається актуальним навіть у сучасних системах управління.

Принцип роботи: ШІМ використовує ширину імпульсу для передачі інформації. Кожен канал управління передає сигнал у вигляді періодичної послідовності імпульсів, де ширина імпульсу визначає значення команди. Наприклад, сигнал тривалістю 1 мс може відповідати мінімальному положенню керуючого елемента, 1.5 мс — середньому, а 2 мс — максимальному.

Сигнали ШІМ зазвичай мають частоту близько 50 Гц, що відповідає періоду 20 мс між імпульсами. Ця частота добре підходить для управління сервоприводами, двигунами та іншими виконавчими механізмами.

Основні переваги:

1. Простота реалізації. ШІМ не вимагає складного апаратного чи програмного забезпечення. Він підтримується більшістю передавачів, приймачів і сервоприводів, що робить його універсальним рішенням для базових систем управління.

2. Широка поширеність. Завдяки простоті та доступності, ШІМ є стандартом у багатьох системах управління, особливо в бюджетних проектах та аматорських розробках.

3. Сумісність з апаратурою. Практично всі сучасні польотні контролери підтримують ШІМ, що дозволяє легко інтегрувати цей протокол у системи радіокерування.

4. Надійність. У системах, де відсутні значні перешкоди або потреба у високошвидкісній передачі даних, ШІМ забезпечує стабільний і надійний зв'язок.

Обмеження:

Попри численні переваги, ШІМ має кілька обмежень, які слід враховувати:

1. Мала швидкість передачі даних. Через передачу кожного каналу окремо протокол не підходить для систем із великою кількістю каналів чи високими вимогами до швидкодії.

2. Чутливість до перешкод. Відсутність спеціальних механізмів корекції помилок робить ШІМ більш вразливим до зовнішніх електромагнітних завад.

Сфери застосування: ШІМ залишається популярним вибором для аматорських проектів, бюджетних дронів і простих систем радіокерування. Його також використовують для управління окремими компонентами, наприклад, сервоприводами або регуляторами швидкості, у комплексних системах, де основний зв'язок забезпечують інші протоколи.

Завдяки своїй простоті та поширеності, ШІМ залишається базовим протоколом зв'язку, який використовується як у навчальних проектах, так і в комерційних продуктах початкового рівня.

Serial Bus (SBUS)

SBUS — це цифровий протокол зв'язку, який широко використовується в сучасних СК БПЛА. Він був розроблений компанією Futaba і став популярним завдяки своїй високій швидкості передачі даних, підтримці багатьох каналів та стійкості до перешкод. На відміну від аналогового ШІМ, SBUS дозволяє передавати дані з декількох каналів одночасно через один сигнальний провід, що значно спрощує конструкцію системи і знижує вагу кабелів[8].

Принцип роботи: SBUS використовує послідовну передачу даних, де всі сигнали від передавача передаються у вигляді цифрових пакетів. Кожен пакет може містити до 16 основних каналів і 2 додаткових, що дозволяє використовувати SBUS у складних системах управління. Протокол підтримує циклічну передачу, завдяки чому дані оновлюються кілька разів за секунду, забезпечуючи високу швидкість реакції.

Основні переваги:

1. Підтримка багатьох каналів: SBUS дозволяє передавати дані з 18 каналів одночасно, що робить його ідеальним для управління складними БПЛА із великою кількістю виконавчих механізмів.

2. Висока швидкість передачі. Протокол забезпечує низьку затримку сигналу, що є критично важливим для високоточних завдань, таких як стабілізація польоту або маневрування.

3. Зменшення кількості проводів. Завдяки послідовному методу передачі, SBUS дозволяє скоротити кількість сигнальних проводів до одного, що зменшує вагу і підвищує зручність інтеграції.

4. Стійкість до перешкод. Цифровий формат передачі і використання контрольної суми забезпечують високу стійкість SBUS до електромагнітних завад, що підвищує надійність зв'язку.

Недоліки:

1. Залежність від сумісності апаратного забезпечення. SBUS підтримується далеко не всіма приймачами і контролерами, що може обмежувати його використання у проектах із нестандартним обладнанням.

2. Складність діагностики. Через цифровий формат даних проблеми у зв'язку складніше діагностувати, ніж у аналогових протоколах, таких як ШІМ. Для цього потрібні спеціальні інструменти.

3. Прив'язка до виробників. SBUS розроблений компанією Futaba і найбільш ефективно працює з обладнанням цього бренду. Хоча існують сумісні пристрої від інших виробників, вони не завжди забезпечують повну функціональність.

Сфери застосування:

SBUS є оптимальним вибором для складних проектів, де потрібна висока швидкість передачі даних і підтримка великої кількості каналів. Його використовують у професійних БПЛА, робототехніці та інших системах, які вимагають високої точності і швидкодії.

SBUS став стандартом у багатьох сучасних системах управління, поєднуючи ефективність і надійність. Його використання дозволяє значно спростити архітектуру системи та підвищити її продуктивність.

Crossfire (CRSF)

CRSF — це високошвидкісний цифровий протокол зв'язку, розроблений компанією Team BlackSheep (TBS). Хоча CRSF забезпечує виняткову продуктивність, включаючи низьку затримку, високу дальність зв'язку та можливість передачі телеметрії, використання цього протоколу пов'язане з низкою недоліків, викликів і складнощів, які необхідно враховувати під час його впровадження в системи управління БПЛА[4][11].

Основні недоліки та складнощі:

1. Висока вартість обладнання. Однією з головних проблем CRSF є висока вартість сумісного обладнання. Приймачі, передавачі та аксесуари TBS Crossfire значно дорожчі порівняно з обладнанням, яке підтримує простіші протоколи, такі як ШІМ або SBUS. Це може бути суттєвим обмеженням для аматорських або бюджетних проектів.

2. Складність налаштування та інтеграції. CRSF надає широкий спектр функцій і можливостей, але це ускладнює налаштування системи, особливо для новачків. Потрібен досвід роботи з протоколами зв'язку і системами управління, щоб правильно налаштувати параметри, такі як потужність передавача, частота оновлення, та інтеграція телеметрії. Неправильні налаштування можуть призвести до нестабільного зв'язку.

3. Обмеженість апаратного забезпечення. CRSF оптимізований для роботи з обладнанням TBS Crossfire, що обмежує сумісність із іншими платформами. Використання стороннього обладнання може спричинити несумісність або втрату

деяких функцій. Це також означає, що розробники повинні будувати свою систему на основі обмеженого набору апаратних рішень.

4. Залежність від складних алгоритмів. CRSF використовує передові алгоритми кодування сигналу та корекції помилок, що забезпечує високу стійкість до перешкод. Проте в складних умовах, таких як міські райони із сильними електромагнітними завадами, ці алгоритми можуть вимагати додаткових обчислювальних ресурсів, що впливає на швидкість і стабільність зв'язку.

5. Вимоги до енергоспоживання. Хоча CRSF може динамічно регулювати потужність передавача, робота на високих потужностях для забезпечення великої дальності зв'язку значно підвищує енергоспоживання. Це може зменшити тривалість польоту дронів, особливо на невеликих апаратах із обмеженим запасом енергії.

6. Високий бар'єр входу для новачків. Через складність налаштування, діагностики та інтеграції CRSF вимагає від користувача глибоких технічних знань. Для новачків це може стати серйозною перешкодою, оскільки помилки в конфігурації можуть призводити до повної втрати зв'язку.

7. Складна діагностика зв'язку. Через використання цифрових сигналів і алгоритмів корекції помилок діагностика проблем із втратою зв'язку потребує спеціального обладнання або програмного забезпечення, що не завжди доступне в польових умовах[11].

Сфери застосування

CRSF (Crossfire) знаходить широке застосування в проектах, де необхідний стабільний зв'язок на великих відстанях, мінімальна затримка та висока надійність. Цей протокол активно використовується для польотів на значні відстані, наприклад, у дослідницьких або моніторингових місіях, де потрібна точність і стійкість до втрати сигналу. У промислових безпілотних літальних апаратах CRSF забезпечує стабільний зв'язок в умовах сильних електромагнітних завад, що робить його ефективним для завдань, таких як моніторинг інфраструктури чи контроль великих об'єктів. Також цей протокол застосовується в рятувальних операціях, особливо в складних умовах, де стабільність і дальність зв'язку є критично важливими для успішного виконання завдань[11].

OpenTX це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, яке використовується для управління сучасними передавачами радіокерування. Воно забезпечує високий рівень налаштування і гнучкості, дозволяючи користувачам адаптувати функціональність передавача до конкретних потреб. OpenTX став популярним серед авіамоделістів та розробників БПЛА завдяки своїм розширеним можливостям, активній спільноті користувачів і постійній підтримці[5].

Особливості OpenTX

OpenTX дозволяє створювати складні конфігурації управління з використанням міксів (поєднань команд), логічних функцій і умовних залежностей. Програмне забезпечення підтримує широкий спектр передавачів, таких як FrSky Taranis, Jumper T16, RadioMaster та інші. Користувачі мають можливість змінювати параметри каналів, створювати макроси для спрощення операцій та інтегрувати телеметрію, яка виводить інформацію про стан апарата безпосередньо на екран передавача.

Переваги OpenTX

Головною перевагою OpenTX є його гнучкість і можливість тонкого налаштування. Користувачі можуть реалізовувати складні функції, такі як автоматичне перемикання режимів польоту, інтеграція додаткових датчиків і кастомізація інтерфейсу. Завдяки відкритому коду OpenTX постійно оновлюється спільнотою розробників, що додає нові функції та розширює сумісність із сучасними апаратними рішеннями.

Недоліки OpenTX

Попри свої можливості, OpenTX має певні складнощі у використанні. Платформа орієнтована на досвідчених користувачів, тому новачкам може бути важко освоїти всі аспекти програмного забезпечення. Високий рівень кастомізації також вимагає часу для налаштування системи під конкретні потреби. Додатковою складністю є потреба в регулярному оновленні прошивки, що може створювати проблеми для користувачів, які не знайомі з технічними аспектами програмування передавачів.

Сфери застосування

OpenTX використовується в радіоуправлінні для широкого спектра літальних апаратів, включаючи дрони, літаки, гелікоптери та наземні моделі. Його можливості дозволяють інтегрувати телеметрію, налаштовувати складні мікси для управління багатофункціональними моделями, а також працювати з нестандартними конфігураціями каналів. OpenTX є ідеальним вибором для користувачів, які шукають гнучкість і кастомізацію в управлінні БПЛА.

1.5. Програмні рішення для керування БПЛА

Open-source платформи для розробки

Open-source платформи стали важливим інструментом у розробці програмного забезпечення для управління безпілотними літальними апаратами. Вони забезпечують розробників потужними інструментами для налаштування, тестування та автоматизації польоту, одночасно зменшуючи витрати на створення нових рішень. Такі платформи, як ArduPilot, INAV та PX4*, надають можливість створювати гнучкі системи управління, адаптуючи їх до специфічних задач і типів апаратів. Їх відкритий код дозволяє не лише використовувати готові рішення, але й модифікувати програмне забезпечення відповідно до потреб конкретного проекту.

ArduPilot є однією з найпоширеніших open-source платформ для управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Завдяки своїй універсальності, багатофункціональності та надійності, ця платформа знайшла широке застосування як у комерційних, так і в аматорських проектах. Вона підтримує різні типи літальних апаратів, включаючи квадрокоптери, літаки, гелікоптери, VTOL (апарати вертикального зльоту і посадки), а також наземні та морські роботизовані системи.

Однією з ключових особливостей ArduPilot є її здатність забезпечувати керування майже будь-яким типом безпілотного апарата, що робить платформу універсальною для реалізації різноманітних проектів. Платформа пропонує розширені функції автоматизації, зокрема підтримку автономних маршрутів, стабілізацію польоту, аварійне повернення додому (RTL) та інші функції, які значно спрощують управління і підвищують безпеку польотів.

ArduPilot сумісний із популярними апаратними платформами, такими як Pixhawk, CubePilot, Holybro Durandal та багатьма іншими, що забезпечує гнучкість у виборі обладнання для конкретного проекту. Відкритий код і активна спільнота розробників роблять платформу сучасною та постійно актуальною, оскільки вона регулярно оновлюється, отримуючи нові функції та виправлення.

Додатковою перевагою є інтеграція з інструментами симуляції та аналізу, такими як SITL (Software in the Loop), які дозволяють розробникам тестувати системи без необхідності реального запуску апарата. Це значно спрощує процес розробки і знижує ризики на етапі тестування. ArduPilot об'єднує всі ці можливості, забезпечуючи потужний і гнучкий інструмент для розробки та управління БПЛА.

. Переваги використання ArduPilot включають гнучкість налаштування, яка дозволяє адаптувати функціонал платформи до конкретних потреб проекту. Завдяки надійності, перевіреним у тисячах проектів, платформа забезпечує стабільну роботу, що викликає довіру серед розробників. Крім того, ArduPilot має детальну документацію, яка значно спрощує інтеграцію і налаштування, забезпечуючи доступ до великої бази знань для розробників.

Серед недоліків ArduPilot можна виокремити складність налаштування, яка обумовлена широким спектром функцій. Це може створювати труднощі для новачків, оскільки оптимальна робота платформи вимагає детальних знань про конфігурацію параметрів і взаємодію компонентів. Високі вимоги до ресурсів також є важливим аспектом, адже реалізація всіх функцій може потребувати потужного апаратного забезпечення, що підвищує витрати на обладнання. Ще одним недоліком є обмежена підтримка нових апаратних компонентів: інтеграція нових рішень залежить від активності спільноти і внесків розробників, що може спричиняти затримки. Крім того, чутливість до налаштувань означає, що неправильна конфігурація параметрів здатна призводити до нестабільності польоту або збоїв, що потребує додаткового тестування для уникнення проблем у роботі платформи.

В той же час ArduPilot використовується в багатьох галузях, включаючи сільське господарство, екологічний моніторинг, пошуково-рятувальні операції, змагання дронів та наукові дослідження. Платформа ідеально підходить як для

ентузіастів, так і для професійних розробників, дозволяючи створювати високотехнологічні рішення з мінімальними витратами. ArduPilot є яскравим прикладом того, як open-source платформи здатні забезпечити ефективне управління БПЛА, залишаючись при цьому доступними і масштабованими.

PX4 — це потужна open-source платформа, яка забезпечує гнучкі та ефективні рішення для створення систем управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Завдяки своїй модульній архітектурі, платформа дозволяє адаптувати функціонал до потреб конкретних проєктів, що робить її універсальним вибором як для комерційних, так і для дослідницьких завдань. Вона підтримує різноманітні типи апаратів, включаючи мультикоптери, літаки, апарати вертикального зльоту і посадки (VTOL), а також наземні й морські роботизовані системи. Її можливості значно розширюють спектр застосувань у таких галузях, як транспорт, сільське господарство, моніторинг, інспекція інфраструктури та інші.

Однією з ключових особливостей PX4 є її модульна архітектура, яка забезпечує високий рівень адаптивності. Це дозволяє розробникам інтегрувати різні компоненти та функції відповідно до специфічних вимог проєкту. Завдяки цьому платформа може бути легко адаптована для простих або складних завдань, що є критично важливим у сучасних динамічних умовах[12].

PX4 базується на використанні операційної системи реального часу (RTOS), що гарантує високу надійність і стабільність навіть у критичних умовах експлуатації. Це робить її особливо привабливою для промислових і комерційних проєктів, де безпека і стабільність є пріоритетними.

Широка підтримка апаратних платформ також є значною перевагою PX4. Вона сумісна з такими популярними рішеннями, як Pixhawk, Holybro Durandal, CUAV та багатьма іншими. Це дозволяє розробникам вільно вибирати апаратне забезпечення, яке найкраще відповідає вимогам проєкту, забезпечуючи високу гнучкість у його реалізації[12].

Платформа також пропонує розширені можливості автоматизації. Вона підтримує автономні режими польоту, включаючи стабілізацію, утримання висоти, аварійне повернення до точки запуску (RTL) і польоти за програмованими

маршрутами. Такі функції полегшують реалізацію складних маневрів і роблять систему максимально функціональною.

Інтеграція PX4 із різними інструментами розробки, такими як QGroundControl для налаштування параметрів, симулятори Gazebo для тестування польотів і аналітичні програми для обробки польотних даних, значно спрощує процес розробки, тестування та оптимізації. Це забезпечує ефективність роботи команди розробників і знижує ризики під час впровадження нових рішень.

Таким чином, PX4 є не лише потужним інструментом для управління БПЛА, але й платформою, яка пропонує сучасні функції, стабільність і універсальність для вирішення найрізноманітніших завдань у сфері безпілотних технологій.

Однією з основних переваг використання PX4 є її виняткова гнучкість і масштабованість. Завдяки модульній архітектурі платформа дозволяє адаптувати функціонал під конкретні потреби, незалежно від складності завдання. Це робить PX4 придатною як для простих проектів із мультикоптерами, так і для складних систем управління промисловими безпілотниками, які виконують специфічні операції. Відповідно, ця універсальність забезпечує можливість ефективного застосування платформи в найрізноманітніших сценаріях, починаючи від невеликих дослідницьких проектів і закінчуючи великими комерційними чи промисловими завданнями.

Надійність PX4 є ще однією важливою перевагою, яка забезпечується завдяки використанню операційної системи реального часу (RTOS). Ця технологія гарантує стабільність роботи навіть у найкритичніших умовах, що особливо важливо для проектів, де безпека та надійність є ключовими вимогами. Завдяки RTOS платформа може забезпечувати безперебійну роботу в умовах високого навантаження або несприятливого середовища, що робить її ідеальним вибором для відповідальних місій, таких як моніторинг важливих об'єктів або виконання рятувальних операцій.

Ще одним важливим аспектом є активний розвиток PX4, який здійснюється завдяки відкритому коду та великій спільноті розробників. Ця спільнота регулярно вдосконалює платформу, додаючи нові функції, оптимізуючи роботу системи та усуваючи можливі недоліки. Такий підхід сприяє не лише актуальності платформи,

але й її відповідності сучасним вимогам і тенденціям. Завдяки постійній підтримці та оновленням PX4 залишається конкурентоспроможним рішенням, що стимулює впровадження інновацій і спрощує інтеграцію платформи навіть у найскладніші системи управління.

Таким чином, PX4 поєднує в собі адаптивність, стабільність і технологічний прогрес, забезпечуючи ефективне і надійне вирішення завдань у сфері безпілотних технологій. Це робить платформу універсальним інструментом для створення та управління передовими системами БПЛА, які відповідають найвищим стандартам якості та функціональності[12].

PX4, хоч і є потужною платформою для розробки систем управління БПЛА, має певні недоліки, які можуть створювати виклики для деяких категорій користувачів. Одним із основних обмежень є її орієнтованість на професійні та промислові проекти. Це робить платформу менш доступною для аматорів або тих, хто не має глибоких технічних знань. Складність налаштувань і інтеграції може стати серйозною перешкодою для новачків, які стикаються з необхідністю розуміння багатьох технічних аспектів.

Крім того, деякі специфічні функції, які легко реалізуються на інших платформах, у PX4 можуть виявитися складнішими через її модульний характер. Наприклад, режими автоматизації або складні алгоритми управління можуть потребувати додаткових зусиль для інтеграції, що може відлякати тих, хто шукає прості рішення. Ця особливість, хоча й надає платформі велику гнучкість, вимагає більше часу і ресурсів для впровадження.

Ще однією проблемою є високі вимоги до технічної інфраструктури, необхідної для роботи з PX4. Для налаштування, тестування та симуляції польотів зазвичай потрібні додаткові інструменти, такі як QGroundControl або симулятори Gazebo. Використання цих засобів може значно збільшити тривалість розробки та підвищити загальну складність процесу. Для невеликих команд або проектів із обмеженими ресурсами це може стати значним бар'єром.

Інтеграція PX4 також потребує глибокого розуміння її архітектури, а також операційної системи реального часу (RTOS). Реалізація нестандартних завдань або розширень може бути викликом навіть для досвідчених розробників, оскільки вона

вимагає значного рівня технічної експертизи. Відсутність чіткої підтримки або документації для певних функцій також може призводити до додаткових труднощів.

Таким чином, PX4, попри свої переваги, може бути складною для інтеграції і використання, особливо для менш досвідчених користувачів або проектів з обмеженими ресурсами. Ці недоліки роблять платформу більш придатною для професійних і промислових задач, де технічна складність виправдана потребами проекту та високими вимогами до функціональності.

PX4 знаходить застосування у промислових проектах, сільському господарстві, транспорті, інспекції інфраструктури, а також у дослідницьких проектах. Її надійність і багатofункціональність роблять платформу популярним вибором для розробників, які прагнуть створювати сучасні системи управління БПЛА.

PX4 — це приклад високоякісного open-source рішення, яке забезпечує гнучкість, надійність і широкий функціонал для створення передових систем управління безпілотниками.

INAV (Interactive Navigation) — це open-source платформа, яка забезпечує баланс між функціональністю та простотою використання, поєднуючи можливості стабілізації польоту з навігаційними функціями. Вона розроблена з урахуванням потреб аматорських і напівпрофесійних проектів, що робить її зручною для широкого кола користувачів. Завдяки підтримці різних типів безпілотних літальних апаратів, включаючи літаки, мультикоптери та VTOL, INAV пропонує універсальне рішення для проектів, які вимагають навігації за програмованими маршрутами, стабілізації польоту і простого налаштування. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс дозволяє легко працювати з налаштуваннями навіть новачкам, забезпечуючи доступ до широкого спектра функцій.

Однією з визначальних особливостей INAV є підтримка різноманітних типів апаратів. Це дозволяє використовувати платформу для управління літаками, квадрокоптерами, гексакоптерами та апаратами з нерухомими крилами, що значно розширює можливості її застосування. Простота налаштування є ще однією

перевагою платформи: дружній до користувача інтерфейс спрощує роботу навіть для тих, хто тільки починає займатися безпілотними технологіями.

Функції навігації, такі як автономні польоти за програмованими маршрутами, утримання висоти і функція повернення додому (RTL), роблять INAV ідеальним вибором для проектів, що вимагають надійності і точності навігації. Ця функціональність особливо корисна для завдань, які потребують чіткого виконання польотних завдань у різних умовах. Платформа також сумісна з популярними апаратними рішеннями, такими як процесори F4, F7 і H7, що дозволяє легко інтегрувати INAV у широкий спектр проектів.

Активна спільнота розробників є ще одним значним плюсом INAV. Постійні оновлення та додавання нових функцій гарантують актуальність платформи, а також її здатність відповідати сучасним технологічним вимогам. Завдяки цьому INAV продовжує залишатися конкурентоспроможним рішенням для тих, хто шукає надійну, функціональну і водночас просту у використанні платформу для управління безпілотними апаратами.

INAV пропонує низку переваг, які роблять її однією з найзручніших платформ для управління безпілотними літальними апаратами. Однією з головних характеристик платформи є її універсальність. INAV здатна підтримувати широкий спектр типів літальних апаратів, включаючи літаки, квадрокоптери, гексакоптери та апарати з нерухомими крилами. Це дозволяє розробникам і користувачам використовувати платформу для реалізації найрізноманітніших проектів, незалежно від їхньої складності чи масштабу.

Зручність налаштування є ще однією суттєвою перевагою INAV. Інтерфейс платформи розроблений таким чином, щоб бути інтуїтивно зрозумілим і доступним навіть для новачків. Це дає можливість легко налаштовувати ключові параметри системи, не вдаючись до складного програмування чи технічних процедур. Навіть користувачі з базовими знаннями можуть швидко інтегрувати INAV у свої проекти, що робить її ідеальним вибором для аматорських і напівпрофесійних задач.

Навігаційні можливості платформи забезпечують ще одну важливу перевагу. INAV підтримує функції автоматичного керування, які дозволяють виконувати точні польотні завдання з мінімальним втручанням оператора. Функції, такі як

утримання висоти, автономні маршрути та повернення до точки запуску, забезпечують надійність і точність виконання завдань у різних умовах. Це робить платформу незамінним інструментом для проектів, де ключовими є ефективність і простота реалізації навігаційних функцій.

Таким чином, INAV поєднує універсальність, зручність і високі навігаційні можливості, пропонуючи користувачам просту у використанні та водночас функціональну платформу для управління безпілотними апаратами.

INAV, попри численні переваги, має певні недоліки, які варто враховувати перед вибором цієї платформи для проекту. Одним із ключових обмежень є те, що INAV орієнтована насамперед на аматорські проекти, через що її продуктивність може виявитися недостатньою для високонавантажених чи промислових сценаріїв. Це обмежує її застосування у складних проектах, де потрібна висока точність, багатofункціональність і витривалість системи.

Ще одним недоліком є менша гнучкість платформи в порівнянні з такими системами, як PX4 або ArduPilot. INAV менш адаптивна для інтеграції у складні системи або реалізації розширених автоматизованих функцій. Це може бути стримуючим фактором для проектів, які потребують нестандартних рішень або великої кількості налаштувань.

Підтримка апаратного забезпечення також має певні обмеження. Хоча INAV сумісна з багатьма популярними платформами, такими як процесори F4, F7 і H7, її інтеграція з менш поширеними або новими апаратними рішеннями може викликати труднощі. Це робить платформу менш зручною для проектів, які базуються на нестандартному обладнанні або потребують використання новітніх компонентів.

Додатково, інтеграція нестандартних сенсорів або функцій може потребувати значного доопрацювання. Це збільшує тривалість розробки та вимагає додаткових технічних знань і ресурсів. Такий підхід може бути проблематичним для розробників, які прагнуть швидко реалізувати проект або працюють з обмеженим бюджетом[12].

Таким чином, хоча INAV є потужним і зручним інструментом для багатьох проектів, її недоліки можуть стати значним викликом у певних умовах, особливо

коли йдеться про складні задачі або високі вимоги до адаптивності та апаратної сумісності.

INAV знаходить своє застосування в хобі-проектах, навчальних ініціативах і експериментальних розробках. Завдяки простоті налаштування та стабільності в роботі, ця платформа є чудовим вибором для тих, хто хоче реалізувати базові проекти без необхідності глибокого технічного занурення. Її функціональність дозволяє ефективно використовувати INAV для моніторингу невеликих територій, де не потрібні складні алгоритми автоматизації чи інтенсивні обчислення[12].

Платформа є ідеальним інструментом для освітніх проектів, зокрема для студентів чи ентузіастів, які хочуть отримати практичний досвід у роботі з безпілотними апаратами. Простий і зрозумілий інтерфейс INAV дозволяє швидко оволодіти основними принципами управління БПЛА, не витрачаючи багато часу на вивчення складних налаштувань. Крім того, її надійність і підтримка базових навігаційних функцій забезпечують стабільну роботу, що є важливим для навчальних цілей або перших експериментальних запусків.

INAV також підходить для невеликих проектів моніторингу, де потрібна надійна платформа, здатна виконувати основні завдання без перевантаження системи складними обчисленнями. Завдяки своїй універсальності і доступності, платформа добре вписується в задачі, які не вимагають значних ресурсів, залишаючись економічно вигідним і функціональним рішенням для ентузіастів і розробників-початківців.

Betaflight — це платформа з відкритим вихідним кодом, яка створена для забезпечення максимальної продуктивності польотних контролерів, що використовуються переважно у гоночних дронах. Її головною метою є оптимізація швидкості, маневреності та точності управління, що робить її незамінною для професійних пілотів та ентузіастів FPV (First Person View). Завдяки своїй вузькій спеціалізації, Betaflight забезпечує чудові результати у динамічних перегонах та виконанні акробатичних трюків, де важлива кожна частка секунди.

Один із ключових аспектів платформи — це її налаштування, оптимізоване для досягнення високої швидкості та точності. Betaflight дозволяє користувачам проводити детальне налаштування параметрів польоту, зокрема PID-регуляторів,

що надає можливість максимально ефективно використовувати технічний потенціал дрона. Це особливо важливо для тих, хто змагається в FPV-перегонах, де навіть незначні вдосконалення можуть забезпечити перевагу над конкурентами.

Сумісність із FPV-системами забезпечує мінімальну затримку сигналу, що критично для керування в реальному часі. Betaflight працює з популярними процесорами, такими як F4, F7 і H7, а також підтримує широкий спектр сенсорів і модулів зв'язку, що робить її надзвичайно гнучкою для адаптації до різних апаратних конфігурацій. Завдяки цьому платформа підходить як для аматорських проєктів, так і для професійних змагань.

Інтерфейс налаштувань Betaflight Configurator відрізняється інтуїтивною зрозумілістю, що дозволяє швидко адаптувати польотний контролер до потреб конкретного проєкту. Користувачі можуть легко оновлювати прошивку, тестувати компоненти системи та змінювати параметри, не витрачаючи зайвого часу на складні технічні процедури. Ця простота використання робить платформу доступною навіть для тих, хто має базовий рівень підготовки.

Активна спільнота користувачів є важливим елементом успіху Betaflight. Завдяки великій кількості учасників спільноти платформа постійно оновлюється: додаються нові функції, виправляються недоліки, а також проводиться оптимізація роботи під специфічні потреби FPV-дронів. Такий підхід забезпечує стабільність і актуальність платформи, яка залишається популярною серед користувачів у всьому світі.

Попри свої переваги, Betaflight має певні обмеження. Її функціонал орієнтований насамперед на гоночні дрони та акробатику, через що платформа менш ефективна для інших типів апаратів, таких як літаки або наземні роботи. Крім того, вона не підтримує розширені режими автономного польоту, наприклад, програмовані маршрути або точне повернення додому, що обмежує її використання в проєктах із високими вимогами до автоматизації. Обмеження апаратної сумісності також можуть стати викликом для тих, хто працює з нестандартними конфігураціями.

Таким чином, Betaflight — це ідеальний інструмент для тих, хто прагне максимальної продуктивності у швидкісних польотах та акробатиці. Її сильні

сторони включають швидкість, маневреність і простоту налаштування, однак обмеження у функціоналі роблять платформу менш універсальною для ширшого спектра завдань.

Betaflight забезпечує численні переваги, які роблять її ідеальним вибором для проектів, орієнтованих на високу швидкість і точність управління. Однією з ключових характеристик є мінімальна затримка сигналу між пультом керування та дроном, що дозволяє точно виконувати навіть найскладніші маневри. Ця особливість є критично важливою для швидкісних перегонів і акробатичних польотів, де час реакції визначає результат. Простота налаштування також є значною перевагою платформи. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс Betaflight Configurator дозволяє швидко адаптувати параметри польоту, пропонуючи готові профілі для різних типів дронів, що полегшує роботу як професіоналам, так і новачкам. Гнучкість платформи проявляється у її здатності працювати з широким спектром апаратних платформ, таких як процесори F4, F7 і H7, що забезпечує адаптацію до різних конфігурацій дронів.

Втім, Betaflight має певні обмеження, які можуть вплинути на вибір платформи для специфічних проектів. Її функціонал значною мірою орієнтований на гоночні дрони і FPV-акробатику, що обмежує її універсальність для інших типів апаратів, таких як літаки або наземні роботи. Крім того, платформа не підтримує розширені навігаційні функції, такі як автономні маршрути або точне повернення додому (RTL), що робить її менш придатною для проектів, які потребують високого рівня автоматизації. Залежність від певного набору апаратних компонентів також обмежує гнучкість платформи у випадках, коли необхідно інтегрувати нестандартні сенсори чи додаткове обладнання. Це може створювати виклики для розробників, які працюють над унікальними конфігураціями.

Betaflight ідеально підходить для проектів, що потребують максимальної продуктивності в умовах високої динаміки. Її основні сфери застосування включають гоночні дрони та акробатичні польоти, де ключовими вимогами є точність управління, швидка реакція і висока маневреність. Завдяки своїй спеціалізації, платформа залишається вибором номер один для ентузіастів FPV і професійних пілотів, які цінують швидкість і ефективність у своїх проектах[13].

1.6. Особливості використання операційних систем реального часу у мікроконтролерах

Операційні системи реального часу (RTOS, Real-Time Operating Systems) є важливим компонентом сучасних мікроконтролерів, які використовуються в системах управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Завдяки RTOS можливо забезпечити одночасне виконання кількох завдань із жорсткими часовими обмеженнями, що критично для стабільності та ефективності роботи польотних контролерів. Системи реального часу дозволяють успішно управляти завданнями, такими як обробка даних із датчиків, стабілізація польоту, передача телеметричних даних і реагування на команди оператора. Однак, попри значні переваги, впровадження RTOS має свої недоліки та виклики, які вимагають особливої уваги від розробників.

Одним із найбільш значущих викликів є складність розробки та налаштування таких систем. Робота з RTOS вимагає глибокого розуміння архітектури систем реального часу і специфіки мікроконтролерів. Некоректне налаштування пріоритетів завдань або неправильне використання ресурсів може призвести до некоректної роботи всієї системи. У критичних випадках це може викликати збої у виконанні життєво важливих функцій, таких як стабілізація польоту, що є неприйнятним для систем управління БПЛА.

Іншим важливим аспектом є підвищені вимоги RTOS до обчислювальних ресурсів. У порівнянні зі стандартними програмними прошивками, системи реального часу споживають більше оперативної пам'яті і вимагають більш потужного процесора. Це обмежує вибір апаратних платформ для реалізації проекту і може потребувати використання дорогих мікроконтролерів із розширеними характеристиками.

RTOS також демонструють чутливість до перевантаження системи. У разі, якщо кількість завдань перевищує доступні ресурси або пріоритети завдань налаштовані неправильно, можуть виникнути затримки у виконанні критичних операцій. У реальному часі такі збої можуть мати серйозні наслідки, включаючи втрату стабільності польоту чи навіть вихід апарата з-під контролю.

Додатково, складність відлагодження та тестування систем реального часу є ще одним суттєвим викликом. У середовищі RTOS одночасно виконується велика кількість завдань, що ускладнює виявлення і виправлення помилок. Для цього потрібні спеціальні інструменти та високий рівень технічної підготовки, що значно збільшує час і вартість розробки.

Ще одним обмеженням є те, що не всі мікроконтролери здатні підтримувати роботу з RTOS або мають достатні ресурси для їх ефективної реалізації. Це обмежує вибір апаратних платформ, які можуть бути використані для створення системи управління, і може ускладнити реалізацію проекту на специфічному обладнанні.

Таким чином, хоча RTOS пропонують значні переваги для управління БПЛА, вони також накладають серйозні вимоги до апаратної платформи, розробки, налаштування та відлагодження. Ці виклики вимагають від розробників ретельного планування та глибоких технічних знань для забезпечення стабільної та ефективної роботи систем реального часу.

Впровадження операційних систем реального часу (RTOS) у проекти з управління безпілотними літальними апаратами супроводжується складнощами, які потребують ретельного врахування. Основна проблема — інтеграція RTOS з апаратними модулями. Сенсори, актуатори та модулі зв'язку мають бути налаштовані для стабільної взаємодії із системою. Неправильна конфігурація може спричинити конфлікти ресурсів, що негативно впливає на стабільність і надійність.

Залежність від конкретної RTOS є ще одним викликом. Системи, як-от FreeRTOS, ChibiOS чи NuttX, мають унікальні особливості, які ускладнюють перехід між платформами. Це обмежує гнучкість розробників і може стати перешкодою в разі зміни вимог проекту.

Збільшується і загальна складність архітектури. Використання RTOS вимагає ретельного управління пріоритетами завдань, синхронізації доступу до ресурсів і обробки переривань. Ці аспекти підвищують ризик помилок, які можуть спричинити серйозні збої, особливо в системах із критичними часовими обмеженнями.

Окрім технічних викликів, потрібні висококваліфіковані фахівці. Розробка багатозадачних систем вимагає досвіду, якого може бракувати, що підвищує вартість проекту через навчання або залучення експертів. Це додає витрат і часу, що критично для проектів із жорсткими рамками.

Отже, впровадження RTOS — це технічно складний і ресурсно витратний процес, який потребує високої кваліфікації та ретельного планування. Проте правильний підхід відкриває значні можливості для реалізації складних систем управління безпілотними апаратами.

1.7. Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено детальний огляд існуючих рішень, які використовуються для управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА), зокрема апаратного та програмного забезпечення, протоколів зв'язку та алгоритмів стабілізації. Розглянуті системи демонструють широкий спектр підходів і технологій, кожна з яких має свої особливості, переваги та недоліки, що впливають на ефективність їх використання у різних сценаріях.

Аналіз open-source платформ, таких як ArduPilot, PX4, INAV, та програмного забезпечення OpenTX, показав, що відкриті рішення забезпечують високу гнучкість і адаптивність систем управління. Проте їх інтеграція вимагає значного рівня технічних знань і ресурсів для налаштування та тестування.

Розглянуті протоколи зв'язку (ШИМ, SBUS, CRSF, OpenTx) підкреслили важливість вибору технології передачі даних залежно від вимог до швидкості, надійності, енергоспоживання та дальності. Важкі умови експлуатації, такі як перешкоди чи робота на значних відстанях, висвітлили необхідність застосування протоколів із високою стійкістю до шумів та адаптивними механізмами зв'язку..

У підсумку, ефективність систем управління БПЛА визначається як якістю використаних компонентів, так і вибором відповідних технологій і підходів до їх інтеграції. Розуміння сильних і слабких сторін кожного рішення дозволяє оптимально поєднувати апаратні та програмні засоби для створення систем, здатних виконувати завдання різної складності в реальних умовах експлуатації.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ РАДІОКЕРУВАННЯ БПЛА НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА

Розробка пристроїв радіокерування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) є одним із ключових напрямів у сучасних технологіях автоматизації та дистанційного керування. Підчас виконання роботи основний акцент зроблено на створенні ефективної, надійної та функціональної системи управління БПЛА на основі мікроконтролера, яка здатна забезпечувати стабільний зв'язок, точне виконання команд і адаптацію до складних умов експлуатації.

Попередні розділи цієї роботи висвітлили еволюцію систем управління БПЛА, основні принципи роботи польотних контролерів, системи передачі відео та радіозв'язку, а також програмні рішення для їх інтеграції. На основі проведеного аналізу визначено ключові технології, компоненти та протоколи, які доцільно використовувати для створення пристрою радіокерування, що відповідає сучасним вимогам до безпеки, функціональності та енергоефективності.

У цьому розділі буде розроблено структурну схему пристрою радіокерування, яка складається з підсистем передавача та приймача. Основною метою є забезпечення інтеграції апаратної та програмної частини, що дозволить реалізувати всі необхідні функції для ефективного керування БПЛА. Зокрема, буде розглянуто принципи побудови підсистем живлення, взаємодії між блоками управління і комунікації, а також забезпечення стабільного функціонування системи при передачі даних у реальному часі.

Дана структурна схема є основою для подальшого розроблення апаратної частини та програмного забезпечення, що дозволить створити універсальну платформу для управління БПЛА різних класів і призначень.

2.1. Структурна схема передавача

Розробка структурної схеми передавача є важливим етапом у створенні системи радіокерування БПЛА. Передавач забезпечує формування, кодування та передачу керуючих сигналів до приймача, що відповідає за виконання команд. У цьому підрозділі буде представлено структурну схему передавача, яка включає

основні блоки: ВЧ-частину, мікроконтролерний блок, систему живлення та інтерфейси зв'язку (рисунок 15).

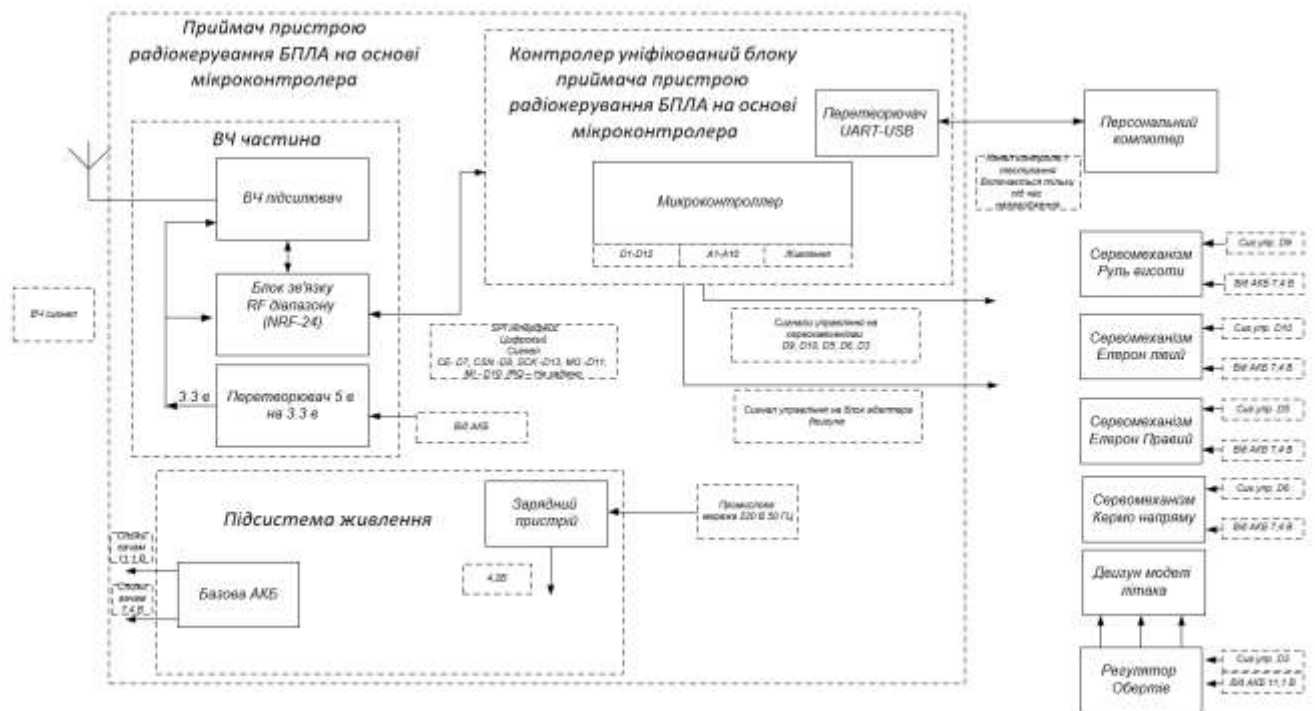


Рисунок 15 – Структурна схема передавача

Опис структурної схеми

Передавач є ключовим елементом системи радіокерування безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Його основне призначення полягає у формуванні, обробці та передачі керуючих сигналів до приймача, що знаходиться на борту БПЛА. Передавач отримує дані від оператора через джойстики, потенціометри або інші пристрої введення, кодує ці дані у відповідний протокол і передає їх за допомогою радіочастотного каналу. Цей процес забезпечує точне дистанційне управління рухом та функціями БПЛА.

Основними функціями передавача є:

- Збирання сигналів від елементів управління (джойстиків, потенціометрів тощо).
- Обробка та кодування сигналів за допомогою мікроконтролера.
- Забезпечення передачі керуючих команд через радіочастотний модуль.
- Підтримка зв'язку з персональним комп'ютером для налаштування та калібрування.

Основні компоненти передавача та їх взаємодія

Передавач складається з кількох функціональних блоків, які працюють у взаємозв'язку для забезпечення стабільної та ефективної роботи. Основні компоненти передавача включають:

1. ВЧ-частина:

- ВЧ підсилювач, який забезпечує посилення сигналу для передачі на великі відстані.
- Модуль зв'язку RF діапазону (NRF-24), який відповідає за формування радіосигналу та його передачу до приймача.

2. Контролер уніфікованого блоку передавача:

- Мікроконтролер, що обробляє дані від периферійних пристроїв, виконує кодування команд та передає їх на RF-модуль.
- Інтерфейси підключення для збирання даних від джойстиків, потенціометрів та інших елементів.

3. Підсистема живлення:

- Базова акумуляторна батарея (АКБ), що забезпечує енергією всі компоненти передавача.
- Перетворювачі напруги, які стабілізують живлення для різних блоків передавача.
- Зарядний пристрій для забезпечення безперебійної роботи системи.

4. Периферійні пристрої:

- Джойстики, які відповідають за передачу команд управління.
- Потенціометр, який регулює специфічні параметри передавача (наприклад, чутливість).

5. Інтерфейси зв'язку:

- Перетворювач UART-USB, який дозволяє підключення до персонального комп'ютера для налаштування, калібрування та моніторингу.

Взаємодія цих компонентів забезпечує узгоджену роботу системи радіокерування, стабільну передачу даних і можливість налаштування під різні сценарії використання.

Контролер уніфікованого блоку передавача

Мікроконтролер є центральним компонентом уніфікованого блоку передавача, який виконує обробку та управління всіма сигналами системи. Він відповідає за збір даних від периферійних пристроїв, таких як джойстики та потенціометри, їх аналіз, обробку та формування керуючих команд. Після обробки ці команди передаються на модуль радіозв'язку (NRF-24) для подальшої передачі до приймача.

Основні функції мікроконтролера:

- Збір аналогових і цифрових сигналів з елементів керування.
- Кодування сигналів у відповідний протокол для передачі.
- Контроль стабільності роботи системи, включаючи моніторинг живлення та стану периферійних пристроїв.
- Підтримка програмного інтерфейсу для налаштування і калібрування системи.

Інтерфейси підключення (D1-D13, A1-A10): забезпечення взаємодії з периферією

Мікроконтролер взаємодіє з периферійними пристроями за допомогою аналогових (A1-A10) та цифрових (D1-D12) інтерфейсів підключення. Ці інтерфейси забезпечують підключення джойстиків, потенціометрів, кнопок і додаткових модулів.

Роль інтерфейсів:

- **Аналогові входи (A1-A10):** використовуються для підключення елементів, які передають аналогові сигнали, наприклад, джойстики. Мікроконтролер перетворює ці сигнали в цифровий формат для обробки.
- **Цифрові входи/виходи (D1-D12):** забезпечують підключення кнопок, світлодіодів чи інших цифрових пристроїв, які передають або отримують дискретні сигнали.

Ця система підключень забезпечує гнучкість конфігурації передавача і можливість підключення додаткових модулів за необхідності.

Перетворювач UART-USB:

Перетворювач UART-USB використовується для забезпечення зв'язку між мікроконтролером і персональним комп'ютером. Він перетворює сигнали послідовного інтерфейсу UART у формат USB, що дозволяє налаштовувати систему, калібрувати пристрій та проводити моніторинг у реальному часі.

Основні функції перетворювача UART-USB:

- Обмін даними між мікроконтролером і програмним забезпеченням на комп'ютері.
- Надання доступу до параметрів системи для їх налаштування або оновлення.
- Діагностика та моніторинг роботи передавача під час тестування або експлуатації.

Ця інтеграція спрощує роботу з передавачем і дозволяє швидко адаптувати його до змінних умов або вимог.

ВЧ-частина передавача

Блок високочастотного (ВЧ) підсилювача є ключовим елементом ВЧ-частини передавача. Його основна функція — підсилення сигналу, сформованого блоком зв'язку RF діапазону, до рівня, необхідного для передачі на значну відстань. Підсилювач збільшує потужність сигналу, забезпечуючи стабільну передачу навіть у складних умовах, таких як наявність радіоперешкод чи значні відстані між передавачем і приймачем.

Основні характеристики ВЧ підсилювача:

- Забезпечення підсилення сигналу без значного спотворення його форми.
- Підтримка стабільної роботи у визначеному діапазоні частот.
- Оптимізація енергоспоживання для продовження автономної роботи системи.

Блок зв'язку RF діапазону (NRF-24)

Блок зв'язку RF діапазону на основі модуля NRF-24 виконує функції формування, модуляції та передачі радіочастотного сигналу. Цей модуль приймає дані від мікроконтролера, кодує їх у радіосигнал і передає через ВЧ підсилювач. NRF-24 забезпечує двосторонній зв'язок, що дозволяє реалізовувати як передачу команд, так і отримання підтверджень або даних з приймача.

Функції модуля NRF-24:

- Формування сигналу в діапазоні частот 2.4 ГГц.
- Інтеграція із мікроконтролером через SPI-інтерфейс, що забезпечує швидкий і надійний обмін даними.

Взаємодія NRF-24 з іншими блоками:

- Отримання даних від мікроконтролера через SPI-інтерфейс.
- Передача сформованого сигналу до ВЧ підсилювача для збільшення дальності передачі.
- Використання перетворювача напруги для живлення модуля на рівні 3.3 В.

Живлення компонентів ВЧ-частини

Для забезпечення стабільної роботи ВЧ-частини передавача необхідне надійне джерело живлення. Компоненти, такі як NRF-24 і ВЧ підсилювач, потребують різних рівнів напруги, які забезпечуються спеціалізованими перетворювачами.

Основні особливості живлення ВЧ-частини:

- **Перетворювач напруги 5 В на 3.3 В:** забезпечує живлення модуля NRF-24, оскільки він працює на зниженій напрузі,
- **Базова АКБ:** живить усю систему передавача, включаючи ВЧ-частину, що забезпечує автономність пристрою.

Завдяки системі живлення, компоненти ВЧ-частини працюють стабільно, забезпечуючи надійний радіозв'язок навіть за умов високих навантажень або перешкод.

Підсистема живлення

Базова акумуляторна батарея (АКБ)

Базова акумуляторна батарея (АКБ) є основним джерелом живлення для всіх компонентів передавача. Вона забезпечує енергією як ВЧ-частину, так і мікроконтролерний блок та периферійні пристрої, що дозволяє системі працювати автономно.

Основні параметри АКБ:

- **Напруга:** стандартно 7.4 В для забезпечення достатньої потужності системи.
- **Ємність:** вибирається відповідно до потреб системи для забезпечення тривалого часу роботи.
- **Тип:** літій-іонна або літій-полімерна батарея, яка забезпечує високу енергоефективність і малу вагу.

Функціональність:

- Постійне забезпечення системи стабільним джерелом енергії.
- Підтримка автономної роботи в польових умовах.

Перетворювачі напруги (5 В на 3.3 В): забезпечення стабільного живлення

Перетворювачі напруги є критичними елементами підсистеми живлення, оскільки різні компоненти системи вимагають різних рівнів напруги для коректної роботи. Основним завданням перетворювача є зниження напруги з 5 В (або 7.4 В від АКБ) до 3.3 В для живлення таких компонентів, як блок зв'язку NRF-24.

Особливості:

- Забезпечують стабільне живлення, навіть якщо напруга АКБ змінюється під час розряду.
- Підтримують високу ефективність перетворення для зменшення енергоспоживання.
- Захищають чутливі компоненти, такі як мікросхеми, від перенапруги.

Зарядний пристрій: джерело енергії для АКБ

Зарядний пристрій забезпечує заряджання базової АКБ. Він підключається до стандартної електромережі (220 В, 50 Гц) і забезпечує зарядку акумулятора з урахуванням його характеристик.

Функції зарядного пристрою:

- Подача стабільної напруги 9 В для заряджання АКБ.
- Автоматичний контроль процесу зарядки для запобігання перенапрузі чи перегріву батареї.

Стабілізоване джерело живлення для АЦП джойстиків

Джойстики, як важливі пристрої введення, використовують аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП), які потребують стабільного джерела живлення для точного зчитування сигналів. Для цього використовується стабілізоване джерело живлення.

Особливості стабілізованого джерела живлення:

- Подача стабільної напруги 5 В на АЦП, незалежно від змін напруги АКБ.
- Забезпечення точності та чутливості джойстиків шляхом усунення шумів у живленні.
- Запобігання впливу перешкод від інших компонентів системи.

Підсистема живлення є критично важливою частиною передавача, оскільки вона забезпечує надійну роботу всіх компонентів, автономність системи та стабільну передачу даних.

Периферійні пристрої

Джойстики 1 і 2 є основними пристроями введення в системі передавача, які дозволяють оператору задавати команди для управління безпілотним літальним апаратом (БПЛА). Вони використовуються для передачі аналогових сигналів, які відповідають положенню важелів, і подальшого їх перетворення в цифровий формат мікроконтролером.

Потенціометр використовується в системі передавача як додатковий елемент управління, який дозволяє регулювати потужність силового двигуна або інші параметри, що потребують точного ручного налаштування.

Призначення:

- **Джойстик 1:** використовується для керування кутом (руль напромку).
- **Джойстик 2:** відповідає за управління елеронами та рулем висоти.
- **Потенціометр:** відповідає за контроль рівня потужності двигуна для плавного збільшення або зменшення обертів

Функціональність:

- Забезпечують плавне і точне введення команд завдяки високій чутливості аналогових сигналів.
- Взаємодіють із аналогово-цифровими перетворювачами (АЦП).

Джойстики є невід'ємною частиною системи керування, що забезпечує інтуїтивне і точне управління БПЛА.

Потенціометр додає гнучкості системі управління, дозволяючи оператору окремо керувати тягою в реальному часі залежно від умов польоту чи поставлених завдань.

Підключення до персонального комп'ютера

Передавач оснащений можливістю підключення до персонального комп'ютера через перетворювач UART-USB. Це підключення забезпечує інтеграцію з комп'ютерними системами для налаштування, моніторингу та діагностики передавача.

Основні можливості підключення:

1. Налаштування параметрів системи:

- Через спеціалізоване програмне забезпечення оператор може налаштовувати параметри роботи передавача, такі як чутливість джойстиків, діапазони сигналів або конфігурацію зв'язку з приймачем.
- Надається можливість оновлення прошивки мікроконтролера для розширення функціональності або виправлення помилок.

2. Калібрування пристроїв:

- Комп'ютер використовується для калібрування джойстиків, потенціометрів та інших елементів управління.
- Цей процес забезпечує точність роботи системи і відповідність вимогам конкретної моделі БПЛА.

3. Моніторинг у реальному часі:

- Персональний комп'ютер отримує дані про стан передавача і його компонентів, включаючи рівень заряду акумулятора, стан модулів зв'язку та вхідні сигнали.
- Це дозволяє оператору перевіряти коректність роботи передавача до і під час використання.

4. Діагностика та тестування:

- Підключення до комп'ютера дає змогу виявляти можливі помилки в роботі системи.
- Діагностичні функції дозволяють проводити тестування ВЧ-частини, периферійних пристроїв і мікроконтролера.

Цей зв'язок забезпечує високий рівень гнучкості та зручності в роботі з передавачем, дозволяючи швидко адаптувати систему під потреби користувача чи умови експлуатації.

Висновок до структурної схеми передавача

Розроблена структурна схема передавача для системи радіокерування безпілотними літальними апаратами забезпечує високий рівень функціональності, надійності та адаптивності. Основними елементами схеми є ВЧ-частина, мікроконтролерний блок, периферійні пристрої та підсистема живлення. Їх інтеграція забезпечує злагоджену роботу системи, включаючи формування, обробку та передачу керуючих сигналів до приймача.

Особливості схеми включають:

- Використання високочастотного підсилювача та модуля NRF-24 для забезпечення стабільного зв'язку навіть за складних умов експлуатації.
- Наявність мікроконтролера, який виконує ключові функції обробки сигналів і управління всіма елементами системи.
- Підсистема живлення з базовою акумуляторною батареєю та перетворювачами напруги, що гарантує стабільну роботу передавача та периферійних пристроїв.
- Підключення до персонального комп'ютера через UART-USB для відладки в процесі розробки.

Схема передавача продумана таким чином, щоб забезпечити гнучкість налаштування, енергоефективність та простоту інтеграції з іншими компонентами системи радіокерування. Це дозволяє ефективно використовувати передавач для управління різними моделями БПЛА, враховуючи вимоги сучасних систем автоматизації.

2.2. Структурна схема приймача

Приймач є ключовим компонентом системи радіокерування безпілотною літальною апарату (БПЛА), відповідальним за отримання, обробку та виконання керуючих сигналів, що надходять від передавача. Його функціональність базується на злагодженій роботі ВЧ-частини, мікроконтролерного блоку та виконавчих механізмів, що забезпечують точне управління параметрами польоту. У цьому розділі буде представлено структурну схему приймача, детально описано її компоненти, їх взаємодію та функціональні можливості. Структурна схема приймача показана на рисунку 16.

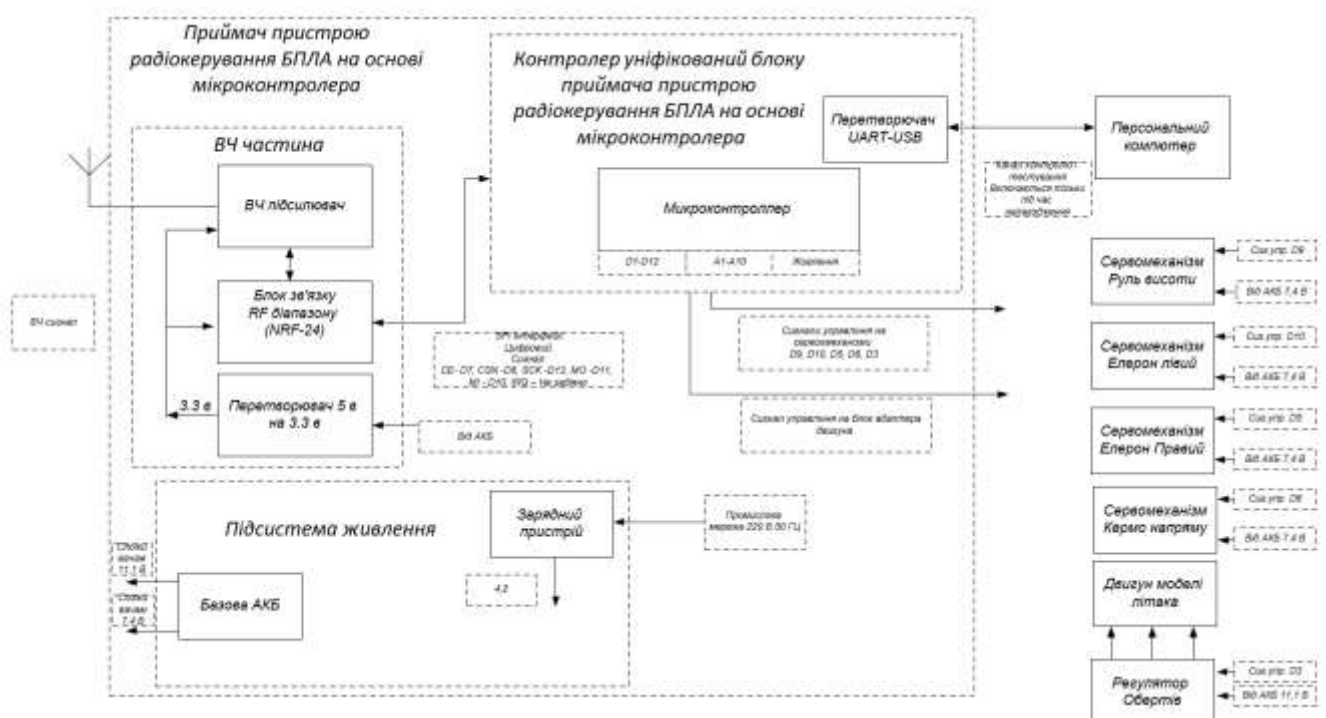


Рисунок 16 – Структурна схема приймача.

Призначення та основні функції приймача у системі радіокерування

Приймач є важливим елементом СРК БПЛА який виконує функції прийому, декодування та передачі керуючих сигналів до виконавчих механізмів. Основне призначення приймача — забезпечити коректне виконання команд, отриманих від передавача, і передати їх до сервомеханізмів, регулятора обертів двигуна та інших компонентів БПЛА.

Основні функції приймача включають:

- Отримання радіосигналів у визначеному частотному діапазоні за допомогою ВЧ-частини.
- Розпізнавання та декодування сигналів, переданих через модуль RF-зв'язку.
- Передача отриманих команд на виконавчі механізми, такі як рулі висоти, елерони, кермо напрямку та регулятор обертів двигуна.
- Забезпечення стабільного і надійного управління в умовах радіоперешкод або складної навколишньої обстановки.

Головні компоненти приймача та їх взаємодія

Приймач складається з кількох ключових компонентів, які забезпечують його функціональність:

1. ВЧ-частина:

- Включає ВЧ підсилювач і модуль NRF-24, які відповідають за прийом радіосигналу, його посилення та перетворення у цифровий формат, зрозумілий для мікроконтролера.

2. Контролер уніфікованого блоку приймача:

- Мікроконтролер є центральним елементом, що виконує обробку прийнятих сигналів і передачу команд на виконавчі механізми. Він також здійснює взаємодію з персональним комп'ютером через UART-USB для налаштування та діагностики.

3. Виконавчі механізми:

- До них належать сервомеханізми, які забезпечують рух рулів висоти, елеронів та керма напрямку, а також регулятор обертів, що контролює потужність двигуна.

4. Підсистема живлення:

- Включає базову АКБ і стабілізовані джерела живлення для забезпечення стабільної роботи мікроконтролера, ВЧ-частини та виконавчих механізмів.

Усі ці компоненти інтегруються між собою через інтерфейси підключення та енергозабезпечення. Їх злагоджена робота гарантує точність і стабільність управління БПЛА у різноманітних умовах експлуатації.

Контролер уніфікованого блоку приймача

Мікроконтролер є центральним елементом уніфікованого блоку приймача, який виконує обробку отриманих сигналів і передачу керуючих команд до виконавчих механізмів. Він приймає декодовані сигнали від модуля RF-зв'язку (NRF-24), аналізує їх і формує вихідні сигнали для управління сервомеханізмами та регулятором обертів двигуна. Мікроконтролер також виконує функції контролю роботи всієї системи, забезпечуючи надійність і точність виконання команд.

Основні завдання мікроконтролера:

- Прийом та декодування команд, отриманих через радіозв'язок.
- Формування сигналів для управління сервомеханізмами та іншими виконавчими пристроями.
- Моніторинг роботи системи та обробка даних від підключених пристроїв.
- Інтеракція з персональним комп'ютером для налаштування та калібрування приймача.

Інтерфейси підключення (D1-D13, A1-A10): інтеграція із сервомеханізмами та іншими пристроями

Мікроконтролер взаємодіє з сервомеханізмами, регулятором обертів двигуна та іншими пристроями через цифрові (D1-D12) і аналогові (A1-A10) інтерфейси. Ці підключення дозволяють інтегрувати широкий спектр виконавчих пристроїв та датчиків для управління різними функціями БПЛА.

- **Цифрові інтерфейси (D1-D13):** забезпечують передачу дискретних сигналів до сервомеханізмів і регулятора обертів. Кожен цифровий вихід контролює окремий виконавчий механізм, такий як руль висоти, елерони, кермо напрямку чи двигун.

- **Аналогові інтерфейси (A1-A10):** дозволяють приймати дані з датчиків або інших пристроїв, які можуть бути використані для додаткового управління чи моніторингу системи.
- **ШИМ-сигнали (PWM):** використовуються для точного регулювання позиції сервомеханізмів і швидкості обертання двигуна.

Ця система підключень дозволяє приймачу гнучко адаптуватися до різних сценаріїв використання БПЛА.

Перетворювач UART-USB для обміну даними з персональним комп'ютером

Перетворювач UART-USB забезпечує зв'язок між мікроконтролером і персональним комп'ютером, спрощуючи налаштування, діагностику та тестування системи. Він перетворює послідовні сигнали UART, які генерує мікроконтролер, у формат USB, що дозволяє інтеграцію з комп'ютером.

Основні функції перетворювача:

- Забезпечення налаштування параметрів системи через програмне забезпечення на ПК.
- Проведення калібрування сервомеханізмів і інших пристроїв.
- Моніторинг роботи системи в реальному часі для виявлення можливих помилок чи несправностей.
- Оновлення програмного забезпечення мікроконтролера для додавання нових функцій чи виправлення помилок.

Інтеграція перетворювача UART-USB робить роботу з приймачем більш зручною та функціональною, дозволяючи оперативно змінювати налаштування та аналізувати роботу системи.

ВЧ-частина приймача

Блок високочастотного (ВЧ) підсилювача є ключовим елементом ВЧ-частини приймача, що забезпечує посилення сигналу, отриманого через антену. Його основна задача — підвищення потужності слабкого сигналу, що надходить від передавача, до рівня, необхідного для коректної роботи блоку зв'язку RF діапазону (NRF-24). Це дозволяє приймачу стабільно функціонувати навіть в умовах значної відстані чи радіоперешкод.

Основні характеристики блоку ВЧ підсилювача:

- Підсилення сигналу без спотворень, збереження його частотних характеристик.
- Підтримка роботи в діапазоні частот, сумісному з NRF-24 (2.4 ГГц).
- Оптимізація для мінімізації енергоспоживання.

Блок зв'язку RF діапазону (NRF-24)

Блок зв'язку RF діапазону на базі NRF-24 є центральним компонентом, що забезпечує прийом, демодуляцію та передачу сигналів до мікроконтролера. Цей модуль працює в частотному діапазоні 2.4 ГГц і забезпечує надійну передачу даних із мінімальною затримкою.

Основні функції модуля NRF-24:

- Прийом сигналу, посиленого ВЧ підсилювачем, і його декодування у цифровий формат.
- Обмін даними з мікроконтролером через інтерфейс SPI, що забезпечує швидку передачу отриманих команд.
- Підтримка двостороннього зв'язку для отримання сигналів зворотного зв'язку.

Інтеграція NRF-24 з іншими компонентами:

- Вхідний сигнал передається від ВЧ підсилювача.
- Отримані команди передаються до мікроконтролера для обробки.
- Використовується стабілізоване живлення від перетворювача напруги 3.3 В.

Забезпечення стабільного живлення компонентів ВЧ-частини

Для коректної роботи ВЧ-частини необхідне стабільне живлення, яке забезпечує стабільність прийому та передачі сигналів.

Компоненти системи живлення:

- **Перетворювач напруги 5 В на 3.3 В:** використовується для живлення NRF-24, оскільки модуль працює на низькій напрузі для зменшення енергоспоживання.
- **Живлення від акумуляторної батареї:** гарантує автономність системи приймача навіть у польових умовах.

Злагоджена робота ВЧ-частини приймача забезпечує точний прийом сигналів, стабільну обробку даних і високу ефективність системи радіокерування в цілому.

Підсистема живлення

Основна акумуляторна батарея (АКБ): її параметри та функціональність

Основна акумуляторна батарея (АКБ) є джерелом живлення для всіх компонентів приймача, забезпечуючи його автономність і стабільну роботу. Вона слугує енергетичною основою для мікроконтролера, ВЧ-частини, сервомеханізмів та інших виконавчих пристроїв.

Основні параметри:

- **Напруга:** 7.4 В для живлення електроніки та сервоприводів; 11.1 В для живлення тягового електродвигуна.
- **Ємність:** вибирається відповідно до розрахунків тривалості автономної роботи, зазвичай 1500–5000 мА·год.
- **Тип:** літій-іонна (Li-Ion) або літій-полімерна (Li-Po) батарея, які мають високу енергоємність при малій вазі.

Функціональність:

- Забезпечує стабільне живлення всієї системи.
- Підтримує безперебійну роботу в умовах високого енергоспоживання, зокрема під час роботи сервомеханізмів.
- Підключається до зарядного пристрою для повторного використання.

Перетворювачі напруги (5 В на 3.3 В): їхня роль у стабільному функціонуванні системи

Для різних компонентів системи потрібна різна напруга живлення. Перетворювачі напруги виконують функцію зниження вхідної напруги від АКБ до рівнів, необхідних для коректної роботи окремих компонентів.

Роль перетворювачів:

- **Перетворення 5 В на 3.3 В:** забезпечує живлення таких чутливих компонентів, як NRF-24 та мікроконтролер.
- Підтримує стабільність напруги, запобігаючи можливим коливанням від розряду батареї.

- Знижує ризик пошкодження чутливих електронних компонентів через перенапругу.

Зарядний пристрій: забезпечення автономності роботи

Зарядний пристрій є важливим елементом підсистеми живлення, що забезпечує безперервну роботу приймача шляхом повторного заряджання АКБ.

Функції зарядного пристрою:

- Забезпечує заряджання АКБ зі стабільною напругою, зазвичай 9–12.6 В, відповідно до типу батареї.
- Оснащений захистом від перезарядки, перегріву та короткого замикання.
- Дозволяє заряджати батарею безпосередньо у пристрої, що полегшує експлуатацію.

Підсистема живлення приймача спроектована таким чином, щоб забезпечувати надійність, енергоефективність і тривалу автономність роботи системи радіокерування. Це дозволяє використовувати приймач у різних умовах експлуатації без ризику втрати функціональності.

Регулятор обертів для силового двигуна

Регулятор обертів є важливим елементом системи приймача, який забезпечує управління потужністю силового двигуна безпілотного літального апарата (БПЛА). Його основна функція полягає у перетворенні сигналів, що надходять від мікроконтролера, у керуючі імпульси для двигуна, регулюючи його швидкість обертання залежно від команд оператора.

Основні функції регулятора обертів:

- **Контроль швидкості двигуна:** плавне збільшення або зменшення обертів залежно від рівня поданого сигналу (наприклад, ширини імпульсу PWM).
- **Забезпечення стабільності обертів:** підтримка заданої швидкості навіть при змінних умовах навантаження.
- **Захист двигуна:** вбудовані функції захисту від перегріву, перевантаження та короткого замикання, які збільшують надійність системи.
- **Енергоефективність:** оптимізація енергоспоживання двигуна для підвищення тривалості автономної роботи БПЛА.

Інтеграція регулятора обертів у систему:

- **З'єднання з мікроконтролером:** регулятор отримує широтно-імпульсні сигнали (PWM) від одного з цифрових виходів мікроконтролера, які визначають швидкість обертів двигуна.
- **Живлення:** регулятор підключений до основної акумуляторної батареї (АКБ), використовуючи її напругу для живлення двигуна.
- **Вихідний сигнал:** регулятор подає струм на силовий двигун, перетворюючи вхідні команди у реальні оберти.

Роль регулятора обертів у системі радіокерування:

Регулятор обертів дозволяє оператору точно управляти швидкістю двигуна в режимі реального часу, що є критично важливим для контролю тяги та маневрування БПЛА. Він також забезпечує плавність роботи двигуна, запобігаючи раптовим змінам швидкості, які можуть негативно вплинути на стійкість і безпеку польоту. Завдяки інтеграції регулятора в загальну систему, забезпечується надійне управління тягою у всіх режимах експлуатації апарата.

Периферійні пристрої та виконавчі механізми

Сервомеханізми є ключовими виконавчими механізмами, які забезпечують виконання команд оператора для управління аеродинамічними поверхнями безпілотного літального апарата (БПЛА). Їх робота базується на отриманні сигналів від мікроконтролера, які перетворюються у відповідний кут повороту механізму, що керує поверхнею.

Основні ролі сервомеханізмів:

- **Руль висоти:** регулює підйомну силу хвостової частини апарата, забезпечуючи підняття чи зниження носа БПЛА для контролю висоти польоту.
- **Елерони:** відповідають за нахил апарата навколо його поздовжньої осі, забезпечуючи керування креном для здійснення поворотів.
- **Кермо напрямку:** управляє рухом апарата навколо його вертикальної осі, контролюючи курс і забезпечуючи повороти у горизонтальній площині.

Функціональність сервомеханізмів:

- Отримують широтно-імпульсні сигнали (PWM) від мікроконтролера, які визначають кут повороту сервоприводу.

- Забезпечують точність і плавність рухів завдяки високій чутливості та швидкій реакції.
- Дозволяють виконувати складні маневри з високою стабільністю.

Силовий двигун

Силовий двигун є основним джерелом тяги для безпілотного літального апарата. Його функція полягає у забезпеченні необхідної швидкості руху апарата та підтримці підйомної сили для польоту.

Основні характеристики та роль:

- **Створення тяги:** двигун забезпечує обертання пропелера, який створює тягову силу, необхідну для горизонтального руху та підйому.
- **Регулювання потужності:** через регулятор обертів оператор може змінювати швидкість обертання двигуна, що дозволяє контролювати швидкість польоту та енергоефективність.

Інтеграція силового двигуна в систему:

- **Живлення:** двигун отримує енергію від акумуляторної батареї через регулятор обертів.
- **Керування:** швидкість обертів регулюється через широтно-імпульсний сигнал (PWM), який генерує мікроконтролер.

Силовий двигун і сервомеханізми працюють у тісному поєднанні, забезпечуючи точне виконання команд оператора. Це дозволяє безпілотному літальному апарату виконувати маневри, підтримувати стабільність у польоті та адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища.

Інтеграція з зовнішніми системами

Приймач має можливість інтеграції з персональним комп'ютером через перетворювач UART-USB, що дозволяє здійснювати відладку, налаштування та моніторинг його роботи. Це підключення є важливим елементом системи, оскільки забезпечує зручність управління, точне налаштування компонентів і діагностику.

Основні аспекти підключення:

- **Відладка:** за допомогою програмного забезпечення на ПК оператор може перевіряти правильність роботи приймача, аналізувати сигнали, які

надходять від передавача, і тестувати виконавчі механізми. Це дозволяє швидко виявити та усунути потенційні проблеми в роботі системи.

- **Налаштування:** підключення до ПК дає змогу налаштовувати параметри роботи мікроконтролера, серводвигунів, регулятора обертів та інших компонентів. Наприклад, можна змінювати діапазони сигналів для сервомеханізмів або параметри ШІМ.
- **Моніторинг:** у реальному часі можна спостерігати за станом системи, включаючи рівень сигналів, напругу живлення, активність сервомеханізмів і роботу силового двигуна.
- **Оновлення прошивки:** через ПК можна завантажувати нове програмне забезпечення для мікроконтролера, що дозволяє додавати функціональність, покращувати стабільність роботи або виправляти помилки.

Інтерфейс UART-USB виступає посередником між приймачем і ПК, перетворюючи сигнали, зручні для обробки комп'ютером. Це підключення спрощує експлуатацію приймача, дозволяє проводити швидке калібрування та забезпечує зворотний зв'язок для відстеження стану системи в процесі її тестування або використання. Завдяки інтеграції з ПК, приймач стає більш гнучким і простим у налаштуванні, що підвищує ефективність його використання у системах радіокерування БПЛА.

Висновки до структурної схеми приймача

Розроблена структурна схема приймача є фундаментальним компонентом системи радіокерування безпілотного літального апарата (БПЛА), забезпечуючи точне виконання команд оператора та стабільне функціонування апарата в умовах реального часу. Схема побудована на основі взаємодії ключових блоків, які злагоджено виконують свої функції, забезпечуючи високу надійність і ефективність.

Приймач складається з ВЧ-частини, що відповідає за прийом та посилення сигналів; мікроконтролера, який декодує отримані команди та передає їх на виконавчі механізми; підсистеми живлення, яка гарантує стабільне енергозабезпечення всіх компонентів; а також сервомеханізмів та регулятора обертів, які виконують безпосереднє управління апаратом.

Завдяки використанню сучасних модулів, таких як NRF-24 для радіозв'язку, мікроконтролера з широким набором інтерфейсів та стабілізованих джерел живлення, приймач демонструє високу енергоефективність та адаптивність. Підключення до персонального комп'ютера через UART-USB забезпечує зручність налаштування, моніторингу та калібрування системи, що дозволяє адаптувати її до різних умов використання та виконувати діагностику.

Структурна схема приймача враховує сучасні вимоги до систем радіокерування, такі як точність, енергоефективність та гнучкість у налаштуванні. Її реалізація забезпечує можливість інтеграції з різними моделями БПЛА, роблячи систему універсальною та надійною для вирішення широкого спектра завдань у галузі автоматизації і дистанційного управління.

2.3. Висновки до розділу

Розробка структурної схеми пристрою радіокерування безпілотного літального апарата (БПЛА) на основі мікроконтролера стала важливим етапом створення комплексної системи управління, здатної забезпечувати стабільність, точність і надійність під час експлуатації. У межах розділу було детально спроектовано структурні схеми передавача та приймача, які працюють у тісній взаємодії для забезпечення ефективного управління апаратом.

Передавач виконує функцію збирання, обробки та передачі команд від оператора, використовуючи джойстики, потенціометр і мікроконтролер для генерації сигналів. Приймач, у свою чергу, забезпечує отримання, декодування та виконання цих сигналів через виконавчі механізми, такі як сервомеханізми та регулятор обертів двигуна. Обидві схеми спроектовані з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, стійкості до перешкод та можливості інтеграції з персональним комп'ютером для налаштування і моніторингу.

Реалізація підсистем живлення з використанням стабілізованих джерел енергії гарантує стабільну роботу навіть за умов значних навантажень, що є критично важливим для системи радіокерування. Використання сучасних модулів зв'язку RF-діапазону та мікроконтролерів з широкими функціональними можливостями забезпечує високу точність обробки сигналів та адаптивність системи.

Загалом розроблена система радіокерування БПЛА демонструє високу надійність, ефективність та гнучкість у застосуванні. Її компоненти можуть бути адаптовані до широкого спектра задач у галузі дистанційного управління та автоматизації. Висновки та рішення, запропоновані в цьому розділі, закладають основу для подальшої розробки апаратної та програмної частини системи управління БПЛА.

З РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ РАДІОКЕРУВАННЯ БПЛА НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА

Функціональна схема є важливим етапом у проектуванні системи радіокерування безпілотного літального апарата (БПЛА), що деталізує роботу компонентів і їхню взаємодію. Вона базується на структурних схемах передавача і приймача, визначаючи зв'язки між модулями, основні сигнальні та енергетичні потоки.

Функціональна схема передавача включає модулі збирання, обробки та передачі команд, такі як мікроконтролер, джойстики, блок зв'язку RF-діапазону та перетворювач UART-USB для налаштування і відладки. У приймачі реалізовано блоки для прийому, обробки сигналів і передачі команд на сервомеханізми та регулятор обертів двигуна.

Метою цього розділу є опис функціональних зв'язків між елементами передавача і приймача, аналіз їхньої взаємодії та забезпечення коректного виконання команд. Функціональна схема слугує основою для подальшої розробки електричних схем і програмного забезпечення системи радіокерування БПЛА.

3.1. Розробка функціональної схеми передавача

Функціональна схема приймача є важливим елементом системи радіокерування безпілотного літального апарата (БПЛА). Вона забезпечує прийом сигналів від передавача, їхню обробку та передачу команд на виконавчі механізми, такі як сервомеханізми і регулятор обертів двигуна.

У цьому підрозділі описується робота основних компонентів функціональної схеми приймача, включаючи ВЧ-частину, мікроконтролер та периферійні пристрої. Акцент зроблено на взаємодії між блоками, обробці сигналів і забезпеченні стабільності роботи системи в реальному часі. Опис функціональної схеми дозволяє зрозуміти інтеграцію приймача в загальну систему радіокерування і його роль у забезпеченні управління БПЛА.

Функціональна схема передавача визначає його як центральний пристрій для передачі керуючих сигналів від оператора до приймача БПЛА. Передавач здійснює

збір команд через периферійні пристрої, їхню обробку мікроконтролером і передачу до приймача за допомогою модуля зв'язку RF-діапазону (NRF-24). Основна мета — точна передача даних у реальному часі для управління рухом і функціями апарата.

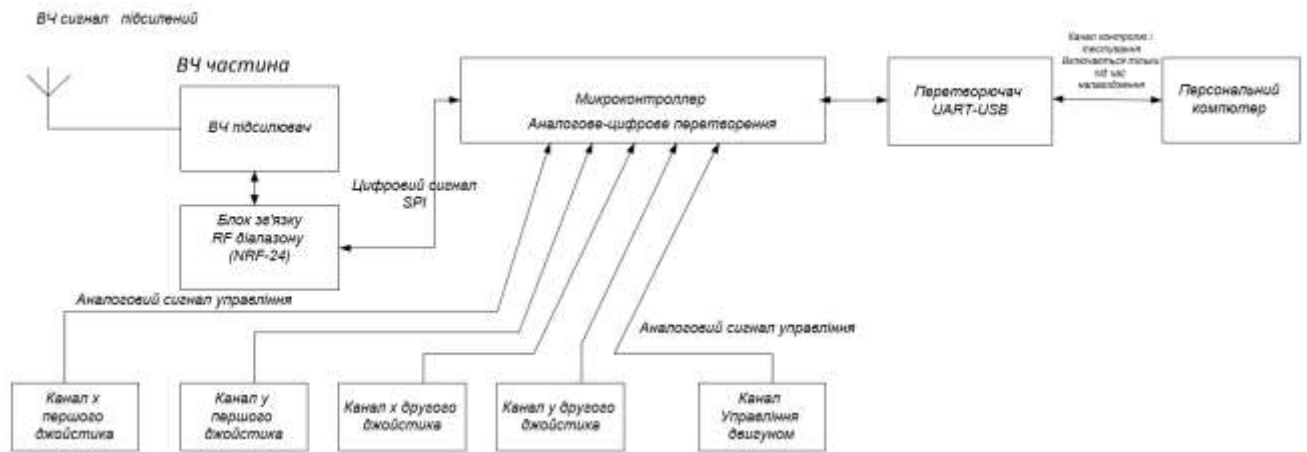


Рисунок 17 – Функціональна схема передавача

Функціональна схема складається з кількох ключових елементів:

ВЧ-частина: забезпечує прийом і передачу радіосигналів, використовуючи антену, ВЧ підсилювач і блок NRF-24.

Мікроконтролер: виконує обробку даних, отриманих від периферійних пристроїв (джойстиків, потенціометрів), і формує цифрові сигнали для модуля RF-зв'язку.

Периферійні пристрої: такі як джойстики та канали керування, слугують для вводу команд оператора.

Перетворювач UART-USB: використовується для діагностики та налаштування передавача через персональний комп'ютер.

Взаємодія між компонентами схеми забезпечує точне формування сигналів управління та їх передачу на приймач із мінімальними затримками.

ВЧ-частина

Блок ВЧ підсилювача виконує функцію посилення сигналу, який передається модулем NRF-24. Це необхідно для забезпечення достатньої потужності сигналу для подолання перешкод та збереження стабільного зв'язку на великій відстані. Завдяки високій чутливості і низькому рівню шуму підсилювач підвищує якість сигналу, зберігаючи його частотні та амплітудні характеристики.

Блок NRF-24 є центральним елементом ВЧ-частини, що виконує функції модуляції та передачі сигналів у діапазоні 2.4 ГГц. Використання інтерфейсу SPI дозволяє ефективно передавати дані між мікроконтролером та блоком RF-зв'язку. NRF-24 кодує інформацію, отриману від мікроконтролера, і передає її у вигляді радіосигналу.

Ця взаємодія між компонентами ВЧ-частини дозволяє передавачу забезпечувати стабільну передачу команд до приймача навіть у складних умовах експлуатації.

Мікроконтролер є основним елементом передавача, який збирає дані з периферійних пристроїв, в даному випадку з джойстиків та кнопок. Джойстики забезпечують двовимірне керування через канали X і Y, що дозволяє оператору задавати напрямок руху та інші параметри.

Більшість сигналів, отриманих від джойстиків, є аналоговими, що вимагає їхнього перетворення у цифровий формат для подальшої обробки мікроконтролером. Вбудований аналогово-цифровий перетворювач (ADC) виконує цю функцію, дозволяючи отримати числові значення, які відповідають положенню джойстика. Завдяки високій точності ADC мікроконтролер може обробляти навіть найменші зміни сигналу, що забезпечує точність управління.

На основі зібраних даних і проведеної обробки мікроконтролер формує керуючі сигнали, які передаються на блок зв'язку NRF-24. Ці сигнали кодуються у відповідному форматі для стабільного зв'язку з приймачем. Крім того, мікроконтролер забезпечує оптимізацію частоти передачі даних, щоб уникнути перевантаження каналу зв'язку.

Таким чином, мікроконтролер виконує ключову роль у функціонуванні передавача, забезпечуючи збирання, обробку та передачу сигналів з високою точністю та мінімальними затримками. Його функціональність дозволяє адаптувати передавач до різних умов експлуатації та вимог управління.

Для передачі команд на приймач мікроконтролер взаємодіє з блоком зв'язку (NRF-24) через високошвидкісний інтерфейс SPI. SPI забезпечує передачу даних у цифровому форматі з мінімальними затримками. Мікроконтролер формує пакети

даних на основі отриманих команд від периферійних пристроїв і передає їх до NRF-24 для модуляції та передачі в ефір.

Перший джойстик відповідає за керування рулем напрямку. За допомогою каналу X визначається величина і напрямок відхилення руля напрямку, що дозволяє точно задавати курс апарата.

Другий джойстик використовується для керування елеронами та рулем висоти. Канал X забезпечує контроль крену апарата через управління елеронами, що дозволяє виконувати повороти, а канал Y використовується для управління рулем висоти, регулюючи підйом або зниження носової частини БПЛА.

Ця система дозволяє забезпечити точний контроль основних параметрів польоту та маневрування.

Канал управління двигуном на основі потенціометра відповідає за передачу сигналу потужності до силового двигуна. Це дозволяє точно регулювати швидкість обертів двигуна, забезпечуючи плавність руху та ефективне використання енергії.

Перетворювач UART-USB забезпечує взаємодію між мікроконтролером та персональним комп'ютером, дозволяючи обмінюватися даними у зрозумілому для ПК форматі. Це дозволяє користувачу зчитувати поточні параметри системи або завантажувати нові налаштування.

Через перетворювач UART-USB оператор може налаштовувати параметри роботи передавача, перевіряти коректність передачі даних та проводити відладку алгоритмів управління. Такий підхід дозволяє оперативно усувати помилки та адаптувати систему до нових вимог.

Персональний комп'ютер використовується як інструмент для розробки та тестування алгоритмів управління передавачем. Завдяки цьому користувач може аналізувати поведінку системи, вносити зміни у програми мікроконтролера та перевіряти їхню коректність у реальному часі.

Передавач збирає сигнали від джойстиків через аналогові входи, перетворює їх у цифровий формат за допомогою ADC і обробляє у мікроконтролері. Після обробки дані передаються на блок зв'язку NRF-24 для передачі до приймача у форматі радіосигналу.

Взаємодія всіх компонентів для забезпечення стабільного управління БПЛА

Кожен елемент функціональної схеми працює у злагодженій взаємодії: периферійні пристрої збирають команди оператора, мікроконтролер обробляє ці дані, а блок зв'язку забезпечує їх стабільну передачу до приймача, що дозволяє оператору здійснювати точне управління БПЛА

Використання двох джойстиків для управління напрямком, креном і висотою, інтеграція перетворювача UART-USB для налаштування та тестування, а також можливість розробки алгоритмів на персональному комп'ютері дозволяють адаптувати систему до широкого спектра завдань. Система характеризується високою надійністю, зручністю у використанні та ефективністю.

3.2. Функціональна схема приймача

Функціональна схема приймача є невід'ємною частиною системи радіокерування безпілотного літального апарата (БПЛА). Приймач забезпечує отримання сигналів від передавача, їх обробку та передачу відповідних команд на виконавчі механізми. Ця схема деталізує процеси прийому, декодування сигналів, а також формування керуючих сигналів для механізмів, таких як сервоприводи та регулятор обертів двигуна. У цьому підрозділі розглянуто особливості побудови та функціонування приймача, включаючи його ключові компоненти та їх взаємодію.

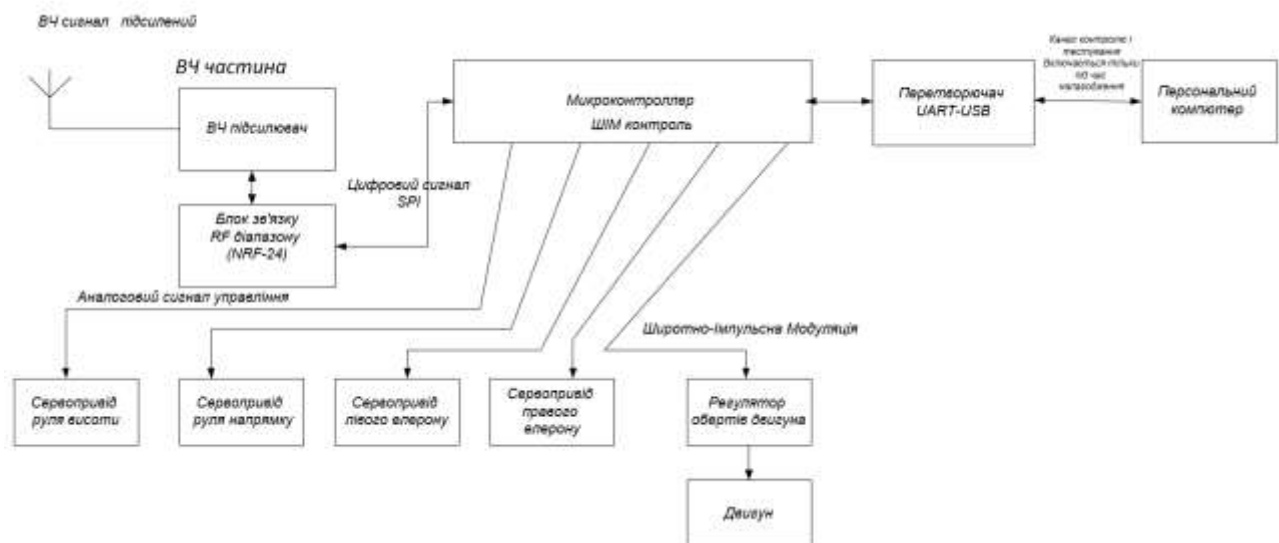


Рисунок 18 – Функціональна схема приймача

Основна задача приймача — це прийом сигналів, переданих від передавача, їх декодування та передача відповідних команд виконавчим механізмам. Сигнал, отриманий через антену, обробляється у ВЧ-частині, де відбувається його підсилення та фільтрація. Далі оброблений сигнал передається до модуля NRF-24, який виконує декодування та передачу даних у цифровому форматі до мікроконтролера.

Мікроконтролер приймача аналізує отримані дані, перетворює їх на керуючі сигнали та розподіляє на відповідні виконавчі механізми. Це включає управління сервоприводами для руля висоти, напрямку та елеронів, а також контроль тяги двигуна через регулятор обертів.

Функціональна схема приймача забезпечує точне виконання команд оператора, підтримуючи стабільність управління навіть у складних умовах експлуатації. Її структура дозволяє ефективно взаємодіяти з передавачем та забезпечувати узгоджену роботу всієї системи радіокерування.

Антену приймача є першим елементом у ланцюзі обробки радіосигналів. Її основна функція полягає у прийомі сигналів, переданих від передавача, і передачі їх на ВЧ підсилювач. Завдяки налаштуванню на робочий діапазон частот (2.4 ГГц), антена забезпечує високу чутливість і ефективність прийому, навіть у присутності зовнішніх перешкод.

Отриманий сигнал, який може бути слабким або зашумленим, передається на ВЧ підсилювач. Підсилювач збільшує потужність сигналу до рівня, необхідного для його стабільної обробки, зберігаючи його частотні характеристики. Крім того, на цьому етапі здійснюється мінімізація шумів, що дозволяє покращити якість сигналу перед передачею на модуль NRF-24.

Після підсилення сигнал передається на модуль зв'язку RF-діапазону (NRF-24), який виконує декодування отриманих даних і передає їх до мікроконтролера через високошвидкісний інтерфейс SPI. Цей етап є критично важливим для подальшого формування точних керуючих сигналів, які забезпечують функціонування виконавчих механізмів.

Таким чином, ВЧ-частина приймача забезпечує надійний прийом та обробку сигналів від передавача, створюючи основу для стабільного та ефективного управління безпілотним літальним апаратом.

Периферійні пристрої

Сервоприводи є основними виконавчими механізмами приймача, які реалізують команди, отримані від передавача. У системі приймача використовуються кілька сервоприводів:

Сервопривід руля висоти регулює підйом і спуск літального апарата шляхом зміни кута атаки. Сервопривід руля напрямку управляє курсом апарата, забезпечуючи точне поворотне маневрування. Сервоприводи елеронів (лівого і правого) забезпечують контроль крену апарата для виконання поворотів або стабілізації у польоті.

Всі сервоприводи отримують керуючі сигнали у вигляді широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), які визначають точне положення механізмів.

Регулятор обертів двигуна забезпечує контроль тяги, необхідної для польоту апарата. Він приймає команди від мікроконтролера через ШІМ-сигнали, регулюючи швидкість обертання двигуна. Ця функція є критично важливою для регулювання швидкості, зміни траєкторії та стабілізації апарата під час польоту.

Силовий двигун є джерелом тяги для апарата, забезпечуючи його горизонтальний рух і підйомну силу. Управління двигуном здійснюється через регулятор обертів, що дозволяє варіювати потужність відповідно до команд оператора. Це забезпечує ефективне використання енергії та стабільність польоту.

Приймач приймає дані від передавача, декодує їх у мікроконтролері, і передає керуючі сигнали до відповідних механізмів (сервоприводів, регулятора обертів). Це дозволяє забезпечити синхронне виконання команд.

Мікроконтролер обробляє сигнали, отримані через модуль NRF-24, забезпечуючи точність і швидкість передачі команд до виконавчих механізмів. Інтеграція цих компонентів гарантує стабільну роботу системи навіть у складних умовах експлуатації.

3.3. Висновки до розділу

У рамках розробки функціональної схеми пристрою радіокерування безпілотного літального апарата (БПЛА) на основі мікроконтролера було спроектовано ключові елементи передавача та приймача, які забезпечують ефективну і стабільну роботу системи радіокерування. Особлива увага приділена взаємодії компонентів, обробці сигналів і управлінню виконавчими механізмами для досягнення високої точності і швидкості передачі команд.

Функціональна схема передавача визначає процес збирання команд від оператора через джойстики та їх обробку мікроконтролером. Далі сигнали передаються модулем NRF-24 до приймача. Інтеграція мікроконтролера, ВЧ-частини, джойстиків і комп'ютерного інтерфейсу забезпечує простоту налаштування, високу точність передачі сигналів та надійність системи.

Функціональна схема приймача дозволяє приймати, декодувати та розподіляти сигнали на виконавчі механізми, такі як сервоприводи та регулятор обертів двигуна. Завдяки узгодженій роботі ВЧ-частини, мікроконтролера і периферійних пристроїв система забезпечує стабільне виконання команд навіть у складних умовах експлуатації.

Розроблена схема враховує сучасні вимоги до енергоефективності, швидкодії та точності управління. Використання мікроконтролера як центрального елемента дозволяє адаптувати пристрій до широкого спектра завдань і умов роботи.

4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ

Розробка алгоритмів є важливим етапом у створенні системи радіокерування безпілотного літального апарата (БПЛА) на основі мікроконтролера. Алгоритми визначають логіку роботи компонентів системи, забезпечуючи взаємодію між передавачем, приймачем та виконавчими механізмами. У цьому розділі описано алгоритми обробки сигналів, формування команд та їх передачі між елементами системи, а також заходи для забезпечення стабільності й точності управління БПЛА.

Описано розробку алгоритмів для обробки даних із джойстиків, генерації широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для керування сервоприводами та регулятором обертів двигуна, а також алгоритмів прийому і обробки сигналів на мікроконтролері. Також розглянуто підходи до обробки помилок, оптимізації енергоспоживання та підвищення надійності системи.

Розроблені алгоритми є основою програмного забезпечення, що забезпечує роботу системи радіокерування, дозволяючи оператору контролювати параметри польоту апарата навіть у складних умовах. У розділі наведено підходи, методи і рішення, використані для створення ефективного і надійного програмного забезпечення[15].

4.1. Розробка алгоритмів передавача

Передавач є ключовою складовою системи радіокерування безпілотного літального апарата (БПЛА), який відповідає за збирання даних з периферійних пристроїв, їх обробку та передачу до приймача. Для забезпечення стабільної роботи передавача необхідно розробити низку алгоритмів, які визначають його функціональність та ефективність.

Основними завданнями при розробці алгоритмів для передавача є:

- Обробка сигналів від джойстиків: Забезпечення коректного зчитування аналогових значень з осей джойстиків, їх калібрування та врахування "мертвої зони" для уникнення помилкових сигналів.

- Кодування даних: Реалізація механізму шифрування даних (наприклад, за допомогою XOR-кодування) для підвищення стійкості до перешкод та захисту інформації.
- Формування повідомлень: Генерація повідомлень у форматі, сумісному з приймачем, із урахуванням їхньої довжини, структури та унікального ідентифікатора.
- Робота з модулем NRF-24: Налаштування модуля для передачі даних через радіоканал, оптимізація параметрів передачі (потужність, частота тощо) для забезпечення стабільного зв'язку.
- Моніторинг та діагностика: Виявлення несправностей джойстиків або радіомодуля та виведення діагностичної інформації до серійного монітору для налагодження та тестування.

Алгоритми, які реалізують ці функції, дозволять забезпечити стабільну роботу передавача, зменшити вплив перешкод на якість сигналу та підвищити загальну надійність системи радіокерування.

Основні блок-схеми алгоритмів передавача зображені на рисунку 19.



Рисунок 19 – Блоксхеми основних алгоритмів передавача

Обробка сигналів від джойстиків

Для забезпечення точного і стабільного управління БПЛА необхідно реалізувати алгоритм обробки сигналів від джойстиків. Цей алгоритм виконує такі ключові функції, як зчитування аналогових значень, калібрування осей джойстиків та врахування "мертвої зони".

Джойстики передають сигнали у вигляді аналогових напруг, які змінюються залежно від положення осей. Мікроконтролер зчитує ці значення за допомогою вбудованого аналогово-цифрового перетворювача (ADC). Для кожної осі (X і Y) зчитується цифрове значення в діапазоні від 0 до 1023.

Цей процес дозволяє отримати числові дані, які відповідають поточному положенню джойстика.

Перед початком роботи необхідно виконати калібрування осей джойстика для визначення їх центрального положення (значення, яке відповідає нейтральному стану). У алгоритмі передавача ця функція реалізується через метод `calc_CV()`. Для покращення точності використовується середнє значення, отриманого з кількох вимірювань під час калібрування:

```
void Pult::calc_CV(void) {
    uint8_t noi = 10;
    uint8_t center_values[_NOA_] = {0, 0, 0, 0};
    for(uint8_t i = 0; i < noi; ++i) {
        for(uint8_t a = 0; a < _NOA_; ++a) {
            center_values[a] += analogRead(_pins[a]);
        }
    }
    for(uint8_t a = 0; a < _NOA_; ++a) {
        for(uint8_t i = 0; i < noi; ++i) {
            _CV[a] = center_values[a];
        }
        _CV[a] /= noi;
    }
}
```

Це забезпечує точне визначення нейтрального стану, який використовується як еталон під час роботи джойстика.

Мертва зона — це невеликий діапазон навколо центрального значення осі, у якому рух джойстика не інтерпретується як команда. Це дозволяє уникнути хибних сигналів через механічні особливості джойстика або випадкові коливання. У алгоритмі реалізовано перевірку на входження сигналу у "мертву зону":


```

bool Pult::in_dead_zone() {
    for(uint8_t a = 0; a < _NOA_; ++a) {
        if (abs(analogRead(_pins[a]) - _CV[a]) >= _dead_zone)
            return false;
    }
    return true;
}

```

Ця функція дозволяє передавачу ігнорувати незначні зміщення джойстика, які не є командами оператора, тим самим підвищуючи точність управління.

Алгоритм обробки сигналів від джойстиків включає зчитування аналогових даних, визначення центрального положення осей через калібрування та врахування "мертвої зони". Такий підхід дозволяє уникнути помилкових сигналів, забезпечуючи стабільність і точність управління БПЛА. Цей алгоритм є базовим для формування команд, які передаються до приймача для виконання маневрів апарата.

Формування повідомлень і кодування

Передавач генерує повідомлення, яке містить дані про поточне положення джойстиків, необхідні для управління безпілотним літальним апаратом (БПЛА). Повідомлення формується у вигляді послідовності значень, які кодують стан осей джойстиків. Для зменшення розміру повідомлення та спрощення його обробки, дані передаються у вигляді текстового рядка з роздільниками.

Процес формування повідомлення реалізований у методі Pult::read():

```

void Pult::read(char *buf, unsigned int bufsize, uint8_t key) {
    String readed_data;
    for (int a = 0; a < _NOA_; ++a) {
        readed_data += String(analogRead(a)); // Зчитуємо значення
        readed_data += ",";                  // Додаємо роздільник
    }

    // Перетворюємо String на масив символів
    readed_data.toCharArray(buf, bufsize);
}

```

Формоване повідомлення має вигляд:

<значення_осі_1>,<значення_осі_2>,...,<значення_осі_N>

Наприклад, якщо значення осей джойстиків становлять 512, 478, 530, 450, то повідомлення виглядатиме так:

512,478,530,450,

Ця структура забезпечує простоту формування повідомлень та їх розбору на приймачі.

Для підвищення захищеності даних від випадкових перешкод і можливого втручання використовується механізм XOR-кодування. Кодування забезпечує простий рівень шифрування, додаючи унікальний ключ до кожного символу повідомлення.

Механізм XOR-кодування реалізовано у методі `Pult::read()`:

```
if (key != 0) {  
    // XOR-кодування даних  
    for (unsigned int i = 0; i < strlen(buf); ++i) {  
        buf[i] ^= key; // XOR кожного символу з ключем  
    }  
}
```

Принцип роботи:

Кожен символ повідомлення обробляється за допомогою операції XOR із заданим ключем.

Ця операція змінює вихідне значення символу, роблячи повідомлення нечитабельним без знання ключа.

На приймачі виконується зворотна операція XOR із тим самим ключем, що дозволяє розкодувати повідомлення.

Наприклад:

- Оригінальне повідомлення: 512,478,530,450,
- Після XOR-кодування з ключем 128: ¾ÍÍÍÎÑÍÎ
- Декодування на приймачі повертає оригінальне повідомлення.

Формування та кодування повідомлень у системі радіокерування БПЛА має низку суттєвих переваг, що підвищують ефективність та надійність передачі даних. Завдяки компактності повідомлень, їхній розмір залишається невеликим, що значно зменшує затримки під час передачі через радіоканал. Це особливо важливо для системи реального часу, де швидкість обміну даними безпосередньо впливає на якість управління апаратом.

Структура повідомлень із чітко визначеними роздільниками дозволяє легко розбирати дані на приймачі. Такий підхід мінімізує час, необхідний для виділення параметрів управління, і спрощує логіку роботи мікроконтролера на стороні приймача. Це, своєю чергою, підвищує загальну швидкодію системи.

Додатковий рівень захисту даних забезпечується через використання XOR-кодування. Такий метод запобігає випадковому втручанню у передані дані, знижує вплив перешкод у радіоканалі та зберігає цілісність інформації. Що важливо, для кодування та декодування повідомлень використовується один і той самий ключ, що спрощує реалізацію алгоритму і забезпечує синхронність між передавачем та приймачем. Завдяки цьому дані залишаються захищеними протягом усього циклу передачі, а процес розкодування на приймачі є таким же простим, як і процес кодування на передавачі.

Таким чином, переваги компактності, легкої обробки структури повідомлень і базової захищеності від втручань роблять підхід до формування та кодування повідомлень високоефективним. Це дозволяє забезпечити стабільну, швидку та безпечну передачу даних між компонентами системи радіокерування.

Робота з модулем NRF-24

Модуль NRF-24 відіграє ключову роль у забезпеченні бездротового зв'язку між передавачем і приймачем. Основні завдання, що виконує цей модуль, включають налаштування параметрів передачі, управління потужністю і частотою сигналу, а також забезпечення стабільності зв'язку навіть у складних умовах експлуатації.

Налаштування модуля для передачі даних через радіоканал

У коді передавача ініціалізація та налаштування модуля NRF-24 реалізуються через функцію `setup_radio()`. Вона виконує кілька критично важливих завдань:

- Ініціалізація модуля: Функція `radio.begin()` активує модуль NRF-24, забезпечуючи готовність до роботи.
- Встановлення адреси каналу: Використовується метод `radio.openWritingPipe(address)`, який встановлює адресу каналу для передачі даних. Це забезпечує унікальність зв'язку між конкретними передавачем і приймачем.
- Режим роботи: Метод `radio.stopListening()` переводить модуль у режим передачі даних, виключаючи можливість прийому.

Код функції виглядає наступним чином:

```
void setup_radio(const byte address[6]) {  
    radio.begin();  
    radio.openWritingPipe(address);  
    radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);  
    radio.stopListening();  
}
```

Оптимізація параметрів передачі

Для забезпечення стабільного зв'язку важливо оптимізувати параметри передачі:

- **Рівень потужності:** Налаштування рівня потужності передавача здійснюється через метод `radio.setPALevel()`. У цьому випадку використовується мінімальний рівень (`RF24_PA_MIN`), що дозволяє зменшити енергоспоживання. При необхідності, рівень потужності можна збільшити для збільшення дальності зв'язку.
- **Частота каналу:** NRF-24 працює в діапазоні 2.4 ГГц, і для уникнення конфліктів із іншими пристроями можна змінювати канал передачі, використовуючи відповідні функції бібліотеки RF24.

Передача даних

Передача даних виконується через метод `radio.write(buffer, bufsize)`, де:

- `buffer` — це сформоване повідомлення, яке містить дані з джойстиків.
- `bufsize` — розмір повідомлення.

У коді цей процес реалізується в основному циклі:

```
void loop() {  
    if(! pult.in_dead_zone()) {  
        pult.read(buffer, bufsize, 128);  
        radio.write(buffer, bufsize);  
        Serial.println(buffer);  
    }  
}
```

Для підвищення стабільності зв'язку NRF-24 дозволяє налаштовувати параметри повторної передачі, частоти оновлення сигналу та ширини пакета. Це гарантує, що дані будуть доставлені до приймача навіть за умов радіоперешкод.

Робота з модулем NRF-24 у передавачі включає налаштування адреси, рівня потужності та режиму роботи, а також передачу даних у компактному форматі через радіоканал. Оптимізація параметрів передачі забезпечує стабільність зв'язку,

енергоефективність та мінімізацію затримок, що є критично важливим для управління БПЛА в реальному часі.

Відладка і розробка нових функцій

У процесі розробки передавача значну увагу приділено можливостям відладки та подальшої розробки нових функцій. Завдяки використанню серійного монітора через інтерфейс UART-USB забезпечується зручний спосіб тестування та аналізу роботи пристрою. Функція `Serial.println(buffer)` дозволяє оператору виводити сформовані повідомлення або діагностичні дані, що значно полегшує ідентифікацію помилок і оцінку коректності роботи мікроконтролера.

Розробка нових функцій, таких як удосконалення алгоритмів обробки сигналів або інтеграція додаткових периферійних пристроїв, реалізується через розширення функціоналу класу `Pult` та бібліотек `RF24`. Завдяки модульній архітектурі коду, нові функції можуть бути легко інтегровані без необхідності значних змін у базовій структурі програми. Це забезпечує гнучкість та адаптивність системи до нових вимог і сценаріїв використання.

У процесі розробки передавача значну увагу приділено можливостям відладки та подальшої розробки нових функцій. Завдяки використанню серійного монітора через інтерфейс UART-USB забезпечується зручний спосіб тестування та аналізу роботи пристрою. Функція `Serial.println(buffer)` дозволяє оператору виводити сформовані повідомлення або діагностичні дані, що значно полегшує ідентифікацію помилок і оцінку коректності роботи мікроконтролера.

Розробка нових функцій, таких як удосконалення алгоритмів обробки сигналів або інтеграція додаткових периферійних пристроїв, реалізується через розширення функціоналу класу `Pult` та бібліотек `RF24`. Завдяки модульній архітектурі коду, нові функції можуть бути легко інтегровані без необхідності значних змін у базовій структурі програми. Це забезпечує гнучкість та адаптивність системи до нових вимог і сценаріїв використання.

Підчас розробки алгоритмів особливу увагу приділено обробці "мертвої зони", визначенню центрального значення осей джойстиків і реалізації базового захисту даних за допомогою XOR-кодування.

Алгоритми передачі сигналів і взаємодії з мікроконтролером дозволяють досягти швидкості, точності та надійності роботи системи радіокерування. Модульна структура коду сприяє легкості налагодження, розширення функціоналу та адаптації до нових вимог, забезпечуючи високий рівень гнучкості передавача у використанні.

4.2. Розробка алгоритмів передавача

Приймач у системі радіокерування безпілотного літального апарата (БПЛА) виконує завдання з прийому, декодування та обробки сигналів, що надходять від передавача. Основна функція приймача полягає у перетворенні отриманих даних на керуючі сигнали для виконавчих механізмів, таких як сервоприводи та регулятор обертів двигуна. Реалізація цього завдання потребує розробки низки алгоритмів, які забезпечують точність і стабільність управління.

Основними алгоритмами, що необхідно реалізувати для приймача, є:

1. **Декодування повідомлень:** Використання XOR-декодування для розшифрування даних, отриманих через радіоканал, з метою відновлення коректної інформації. Цей механізм забезпечує захист від помилок і втручання у передачу.
2. **Обробка команд:** Алгоритм розбору отриманого повідомлення, визначення значень для кожного виконавчого механізму та перетворення їх у відповідний формат для управління сервоприводами.
3. **Управління сервоприводами:** Формування сигналів PWM (широтно-імпульсної модуляції) для кожного сервопривода, включаючи перетворення значень у діапазони, прийнятні для конкретних пристроїв[16].
4. **Режим "Центрального значення":** Коли джойстики пульта дистанційного керування перебувають у центральному положенні, передавач не випромінює сигналів. У цьому випадку приймач автоматично розпізнає цей стан і встановлює значення сервоприводів у їх центральне положення. Це дозволяє забезпечити стабільність польоту та уникнути непередбачуваних маневрів.

5. Ініціалізація і калібрування: Налаштування меж PWM для кожного сервопривода, включаючи регулятор обертів, з метою забезпечення коректної роботи системи.

У коді реалізовано ключові функції для ініціалізації сервоприводів, декодування повідомлень і обробки команд. Так, методи класу Aircraft відповідають за трансформацію даних із цифрового формату в PWM-сигнали, які керують конкретними механізмами. Наприклад, метод `proces_command()` розподіляє значення по сервоприводах відповідно до отриманих даних, а метод `set_mid()` забезпечує повернення виконавчих механізмів у середнє положення.

На рисунку 20 наведено основні алгоритми приймача.

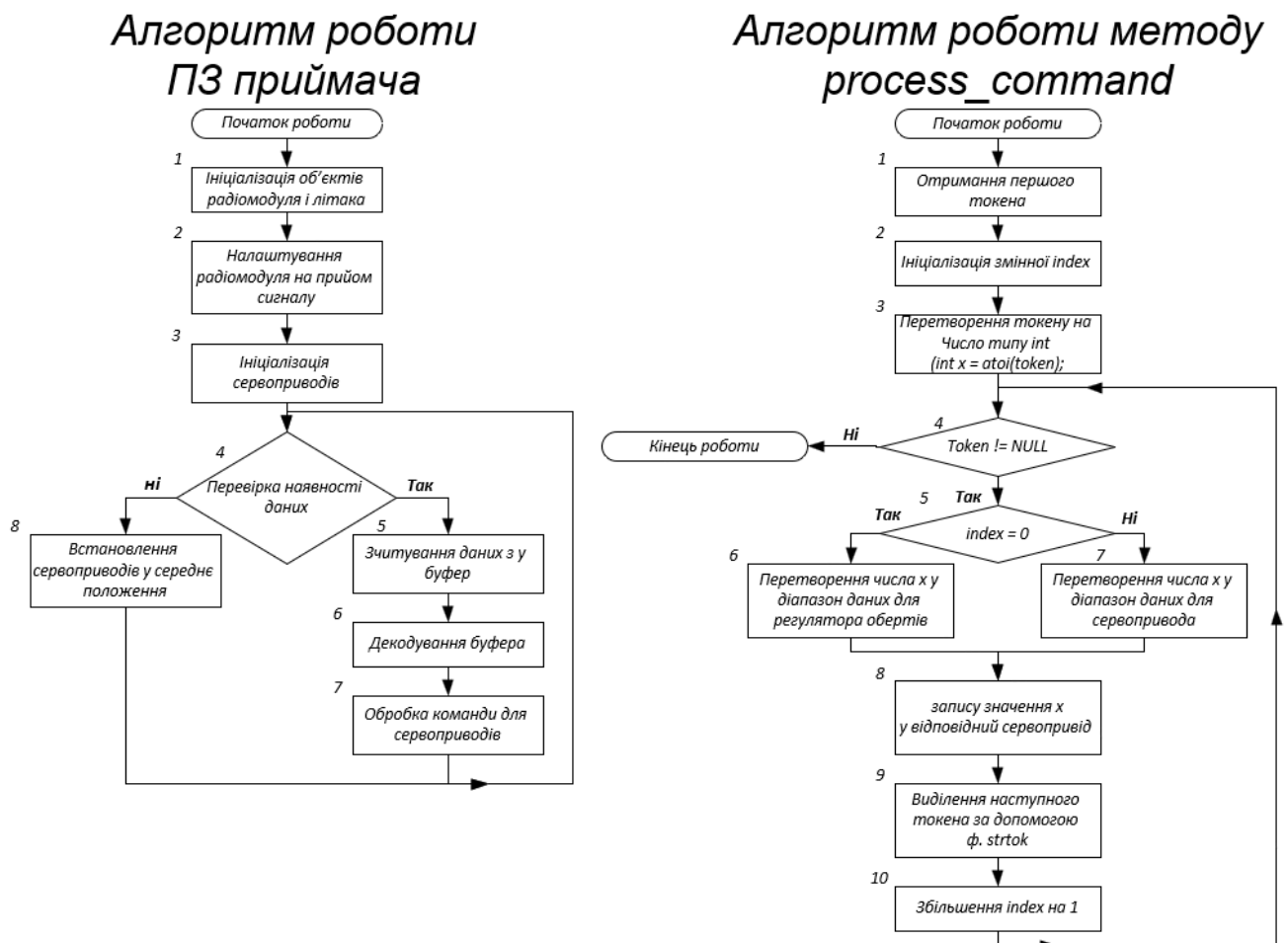


Рисунок 20 – Основні алгоритми роботи приймача

Розробка цих алгоритмів дозволяє приймачу працювати як ефективний і точний контролер для виконання команд, що забезпечує стабільне і безпечне управління літальним апаратом навіть у складних умовах. У цьому підрозділі детально описано процес розробки зазначених алгоритмів, включаючи їхню реалізацію, оптимізацію та інтеграцію в систему.

Декодування повідомлень

Декодування повідомлень у приймачі забезпечує розшифрування даних, отриманих через радіоканал, для їхньої подальшої обробки. Цей процес реалізований за допомогою XOR-декодування, яке є зворотним до кодування, що застосовується на стороні передавача. Використання одного і того ж ключа для кодування і декодування гарантує, що дані будуть відновлені у їхньому початковому вигляді.

У приймачі цей механізм реалізовано у функції `decode_message()`. Вона проходить по всіх байтах отриманого повідомлення і виконує операцію XOR із заданим ключем:

```
void decode_message(char *buf, const unsigned int bufsize, const byte key) {
    if (key != 0) {
        // XOR-декодування даних
        for (unsigned int i = 0; i < bufsize; ++i) {
            buffer[i] ^= key; // XOR кожного символу з ключем
        }
    }
}
```

Ця операція забезпечує:

- **Коректне відновлення даних:** Операція XOR із тим самим ключем повертає закодовані дані до їхнього оригінального стану.
- **Захист від втручання:** Декодування дозволяє перевірити, чи повідомлення отримано без спотворень.

Оскільки механізм кодування і декодування використовує однакову логіку, опис функції в цьому контексті є аналогічним алгоритму, що реалізований у передавачі. Це забезпечує узгодженість між двома частинами системи та надійність передачі даних у радіоканалі.

Обробка команд

Обробка команд у приймачі забезпечує розбір отриманого повідомлення, визначення значень для кожного виконавчого механізму та їх перетворення у формат, придатний для управління сервоприводами. Цей процес реалізований у функції `proces_command()` класу `Aircraft`.

Розбір повідомлення

Отримане повідомлення, яке є рядком значень, розділених комами, передається у функцію `proces_command()`. За допомогою функції `strtok()` рядок розбивається на окремі частини, кожна з яких відповідає конкретному виконавчому механізму:

```
char* token = strtok(buf, ",");  
int index = 0;
```

Призначення значень для виконавчих механізмів

На основі індексу кожного розділеного значення визначається, до якого механізму воно належить:

Якщо значення належить регулятору обертів (індекс 0), воно перетворюється у діапазон PWM, придатний для регулятора обертів двигуна, за допомогою методу `to_throttle()`;

Якщо значення належить одному з сервоприводів (індекси 1-4), воно перетворюється у відповідний діапазон кутів повороту за допомогою функції `to_servo()`:

```
if (index == 0) {  
    x = to_throttle(x, 0, 1023);  
} else {  
    x = to_servo(x, 0, 1023);  
}
```

Управління сервоприводами

Після визначення значення воно передається відповідному сервоприводу для виконання команди:

```
_servos[index].write(x);
```

Повний код функції виглядає так:

```
void Aircraft::proces_command(char *buf) {
```

```
void Aircraft::proces_command(char *buf) {  
    char* token = strtok(buf, ",");  
    int index = 0;  
    int x = atoi(token);  
    while (token && index < 5) {  
        if (index == 0) {  
            x = to_throttle(x, 0, 1023);  
        } else {  
            x = to_servo(x, 0, 1023);  
        }  
        _servos[index].write(x);  
    }  
}
```

```

        token = strtok(NULL, ",");
        index++;
    }
}

```

Перетворення значень

Для регулятора обертів і сервоприводів значення з отриманого повідомлення перетворюються з діапазону 0–1023 у відповідні робочі діапазони:

Діапазон PWM встановлюється в межах MIN_PWM і MAX_PWM, які задаються під час ініціалізації:

```

• int Aircraft::to_throttle(int x, int in_min, int in_max) {
•     return map(x, in_min, in_max, _min_thr, _max_thr);
• }
•

```

Кути обертання обмежені значеннями 0–90°:

```

• int Aircraft::to_servo(int x, int in_min, int in_max) {
•     return map(x, in_min, in_max, 0, 90);
• }

```

Алгоритм обробки команд забезпечує розбір отриманого повідомлення, асоціацію його частин із виконавчими механізмами та перетворення значень у формат, сумісний із сервоприводами і регулятором обертів. Це гарантує точність і стабільність виконання команд, переданих оператором, навіть у складних умовах експлуатації.

Режим "Центрального значення"

Режим "Центрального значення" забезпечує стабільність роботи БПЛ у ситуаціях, коли джойстики пульта дистанційного керування перебувають у нейтральному положенні, а передавач не випромінює сигналів. У цьому випадку приймач визначає відсутність даних у радіоканалі та автоматично встановлює значення сервоприводів у їх центральні положення.

Логіка роботи

У коді приймача цей режим реалізовано в основному циклі функції loop(). Якщо дані від передавача відсутні (тобто radio.available() повертає false), викликається метод set_mid() класу Aircraft, який встановлює всі виконавчі механізми в центральні значення:

```

void loop() {
  if (radio.available()) {
    radio.read(&buffer, bufsize);
    decode_message(buffer, bufsize, key);
    aircraft.proces_command(buffer);
  } else {
    aircraft.set_mid();
  }
}

```

Установлення центральних значень

Метод `set_mid()` визначає середнє положення для кожного виконавчого механізму:

Регулятор обертів установлюється на половину діапазону між мінімальним і максимальним значеннями PWM.

Сервоприводи установлюються у положення 45° , що відповідає нейтральному положенню керуючих поверхонь.

Код методу `set_mid()`:

```

void Aircraft::set_mid() {
  int mid_value = 0;
  for (int i = 0; i < _NOS_; ++i) {
    if (i == 0) {
      mid_value = (_min_thr + _max_thr) / 2;

    } else {
      mid_value = 45;
    }
    _servos[i].write(mid_value);
  }
}

```

Переваги режиму "Центрального значення"

- **Стабільність польоту:** Установлення сервоприводів у центральні значення запобігає хаотичним маневрам або втраті керування в разі відсутності сигналу.
- **Безпека:** Установка регулятора обертів на середнє значення неконтрольованого руху апарата.
- **Простота реалізації:** Логіка автоматичного повернення до центральних значень дозволяє мінімізувати складність коду, забезпечуючи надійність системи.

Режим "Центрального значення" важливий для стабільності роботи приймача у ситуаціях, коли сигнал від передавача відсутній. Цей режим дозволяє

автоматично перевести виконавчі механізми у нейтральні положення, запобігаючи непередбачуваним маневрам і забезпечуючи безпеку польоту.

4.3. Висновки до розділу

У розділі "Розробка алгоритмів пристрою радіокерування БПЛА на основі мікроконтролера" було створено комплексний набір алгоритмів, які забезпечують точну, стабільну та надійну роботу передавача і приймача. Розроблені алгоритми охоплюють усі ключові аспекти функціонування системи: від формування, кодування і передачі сигналів на передавачі до їх декодування, обробки та виконання команд приймачем.

На стороні передавача реалізовано алгоритми зчитування сигналів від джойстиків, обробки "мертвої зони", формування структурованих повідомлень і їхнього XOR-кодування для захисту від перешкод. Передача даних здійснюється через модуль NRF-24, налаштований на оптимальну потужність і частоту роботи.

У приймачі реалізовано алгоритми декодування повідомлень, розподілу команд на виконавчі механізми, формування широтно-імпульсної модуляції (PWM) для управління сервоприводами та регулятором обертів двигуна. Особливу увагу приділено режиму "Центрального значення", який забезпечує безпеку і стабільність роботи системи у разі відсутності сигналу від передавача.

Розроблені алгоритми демонструють високу ефективність завдяки модульності коду, що спрощує його налагодження, розширення функціоналу і адаптацію до нових умов експлуатації. Такий підхід забезпечує надійне керування БПЛА, зменшує затримки в роботі системи і гарантує точне виконання команд оператора навіть у складних умовах експлуатації.

5 ОПИС МАКЕТУ ТА ТЕСТУВАННЯ ПРИСТРОЮ РАДІОКЕРУВАННЯ БПЛА НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА

У цьому розділі представлено опис макету пристрою радіокерування БПЛА створеного на основі структурних схем передавача і приймача. Макет виконує функцію тестової платформи, що дозволяє перевірити реалізацію алгоритмів, взаємодію компонентів і ефективність системи управління.

Структурні схеми передавача і приймача стали основою для розробки апаратної частини макету. У передавачі реалізовано зчитування сигналів з джойстиків, їх обробку мікроконтролером та передачу даних через модуль радіозв'язку. Приймач забезпечує прийом і декодування сигналів, обробку команд і передачу їх на виконавчі механізми, такі як сервоприводи та регулятор обертів двигуна.

Цей розділ містить детальний опис фізичної реалізації макету, схеми з'єднань компонентів, а також пояснення функціонування кожного елемента у складі системи. Макет пристрою є першим кроком до створення повноцінної системи управління БПЛА, яка зможе забезпечити стабільне та надійне виконання польотних завдань. На основі цього макету в майбутньому буде побудована літаюча модель БПЛА, що дозволить провести тестування в реальних умовах і оцінити ефективність запропонованих рішень.

5.1. Обґрунтування вибору компонентів пристрою

У підрозділі "Обґрунтування вибору компонентів системи радіокерування" викладено процес аналізу та вибору апаратних елементів для реалізації системи радіокерування безпілотного літального апарата (БПЛА). Вибір компонентів є ключовим етапом, який визначає функціональність, надійність і масштабованість системи.

Метою цього етапу є підбір оптимальних компонентів, які відповідають вимогам щодо точності управління, енергоефективності, доступності та економічності. У рамках підрозділу виконано порівняння рішень, представлених на

ринку, з урахуванням їхніх технічних характеристик, сумісності та перспективності використання.

Особлива увага приділяється вибору мікроконтролера, модулів радіозв'язку, джойстиків, сервоприводів, регулятора обертів, двигуна та джерел живлення. У підрозділі наведено обґрунтування вибору кожного компонента на основі їхньої відповідності поставленим задачам і вимогам проєкту.

Результати цього підрозділу стали основою для побудови макету системи радіокерування, забезпечивши баланс між ефективністю, продуктивністю та вартістю системи.

Обґрунтування вибору мікроконтролера

Для реалізації системи радіокерування як у передавачі, так і в приймачі, використано мікроконтролер **Arduino Nano**. Вибір цього компонента зумовлений його технічними характеристиками, зручністю у використанні та відповідністю вимогам проєкту. Щоб підтвердити доцільність вибору, проведено порівняння з іншими популярними мікроконтролерами: **ESP8266**, **STM32F103C8T6**.

Таблиця 1 – Порівняння характеристик мікроконтролерів для системи радіокерування БПЛА

Характеристика	Arduino Nano	ESP8266	STM32F103C8T6
Процесор	ATmega328P	Tensilica L106	ARM Cortex-M3
Тактова частота	16 МГц	80 МГц	72 МГц
Кількість аналогових входів	8	0	10
Кількість цифрових входів	14	11	15
Енергоспоживання	Низьке	Помірне	Низьке
Вартість	Низька	Середня	Середня
Живлення	5 В / 7–12 В	3.3 В	3.3 В

Аналіз:

1. Arduino Nano:

- Найкраще підходить для компактних конструкцій через невеликі розміри.
- Проста інтеграція завдяки Arduino IDE і широкій підтримці бібліотек.
- Низьке енергоспоживання, що ідеально підходить для автономної роботи від акумулятора.
- Підтримка всіх необхідних периферійних пристроїв.

2. ESP8266:

- Забезпечує вбудований Wi-Fi, що корисно для проєктів з бездротовим підключенням до мережі. Проте Wi-Fi не використовується в цьому проєкті, тому ESP8266 має надлишкову функціональність і вище енергоспоживання.
- Менша кількість GPIO обмежує можливість підключення кількох периферійних пристроїв.

3. STM32F103C8T6 ("Blue Pill"):

- Продуктивніший процесор (72 МГц) забезпечує швидшу обробку даних.
- Велика кількість GPIO дозволяє підключати більше пристроїв. Проте для задач цього проєкту продуктивність і кількість GPIO STM32 надлишкові.
- Вимагає складнішого налаштування середовища розробки (STM32CubeIDE, PlatformIO) і використання специфічних бібліотек.

Переваги Arduino Nano:

- **Простота використання:** Arduino IDE є інтуїтивно зрозумілою, а готові бібліотеки спрощують розробку.
- **Достатня продуктивність:** Хоча STM32 має вищу тактову частоту, Nano забезпечує достатню швидкість для задач управління БПЛА.
- **Енергоефективність:** Arduino Nano має низьке енергоспоживання, що дозволяє зменшити навантаження на акумулятори.
- **Вартість:** Nano є одним із найдешевших варіантів, зберігаючи при цьому необхідний функціонал.

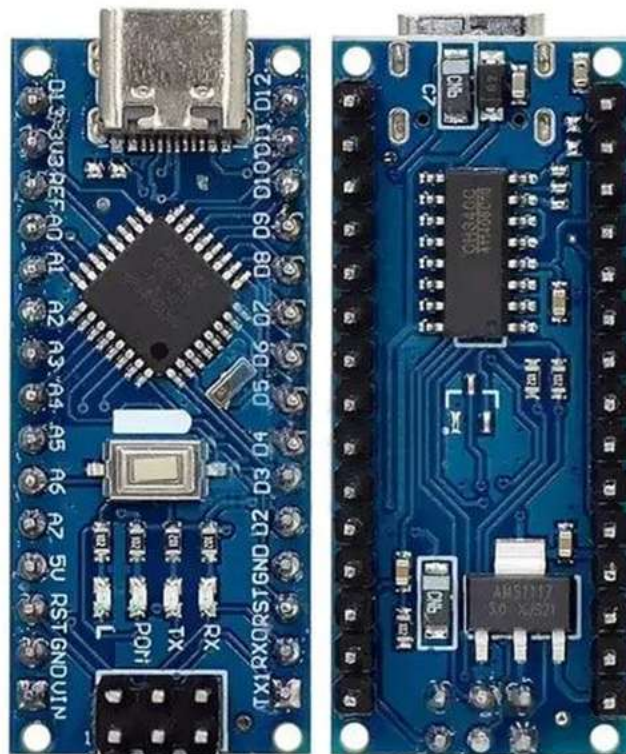


Рисунок 21 – Мікроконтролер Arduino Nano

Arduino Nano є оптимальним вибором для системи радіокерування БПЛА завдяки своїй компактності, енергоефективності, простоті інтеграції та достатній продуктивності. У порівнянні з ESP8266і STM32 "Blue Pill", Arduino Nano демонструє ідеальний баланс між функціональністю, простотою використання і вартістю, роблячи його найкращим вибором для даного проєкту.

Обґрунтування вибору джойстиків

Для реалізації системи радіокерування в передавачі використано джойстики, які вирізняються простотою у використанні та доступною вартістю. Основними критеріями їх вибору стали зручність інтеграції з мікроконтролером, простота обробки сигналів та економічність.

Технічні особливості джойстиків:

1. Простота інтеграції:

Джойстики з аналоговими виходами легко підключаються до входів мікроконтролера Arduino Nano, що дозволяє уникнути використання додаткових перетворювачів сигналів і складних алгоритмів.

2. Доступність і дешевизна:

Ці джойстики є одними з найдоступніших на ринку, що робить їх ідеальними для прототипування і зменшує загальні витрати на створення макету.

3. Функціональність:

Джойстики забезпечують керування у двох осях (X і Y), що дозволяє задавати напрямок руху та інші параметри. Додаткова кнопка може використовуватися для розширення функцій передавача.

4. Компактність:

Маленькі габарити джойстиків полегшують їх розміщення в корпусі передавача, забезпечуючи зручність у використанні.

5. Стабільність роботи:

Аналогові виходи дають стабільні значення сигналів (від 0 до 1023), що забезпечує плавне і точне керування без значних спотворень.



Рисунок 22 – Джойстик

Обрані джойстики відповідають вимогам проєкту завдяки своїй простоті, низькій вартості та стабільності роботи. Вони забезпечують легкість інтеграції з мікроконтролером Arduino Nano, що дозволяє значно спростити апаратну частину передавача і прискорити розробку програмного забезпечення. Таким чином, обрані джойстики є оптимальним вибором для реалізації системи радіокерування БПЛА.

Обґрунтування вибору радіомодуля

Для системи радіокерування БПЛА обрано радіомодуль **nRF24L01** з додатковою зовнішньою антеною. Цей модуль забезпечує ефективне співвідношення ціни, дальності передачі та простоти інтеграції, що робить його оптимальним вибором для проєкту.

Причини вибору nRF24L01:

1. **Ціна/дальність передачі:** nRF24L01 пропонує значну дальність передачі (до 1000 м у версії з зовнішньою антеною) за дуже низькою вартістю. У порівнянні з іншими модулями, такими як XBee або LoRa, nRF24L01 є більш доступним, забезпечуючи достатню дальність для управління БПЛА в межах прямої видимості.
2. **Простота використання:** модуль легко інтегрується з мікроконтролерами завдяки простому підключенню через SPI-інтерфейс. Мінімальна кількість необхідних налаштувань дозволяє швидко запустити систему, навіть у межах прототипування.
3. **Гнучкість налаштувань:** модуль підтримує динамічну зміну швидкості передачі (250 кбіт/с, 1 Мбіт/с, 2 Мбіт/с), потужності сигналу та ширини каналів, що дозволяє адаптувати систему до умов експлуатації. Наприклад, зменшення швидкості передачі збільшує дальність зв'язку, а зниження потужності економить енергію.
4. **Наявність готових бібліотек:** для nRF24L01 існують численні бібліотеки, такі як RF24 для Arduino IDE, що спрощують процес розробки. Бібліотеки забезпечують підтримку базових функцій, таких як налаштування адрес, читання та запис даних, що скорочує час на реалізацію алгоритмів.

Таблиця 2 – Порівняння характеристик радіомодулів для системи радіокерування БПЛА

Характеристика	nRF24L01	XBee Series 2	LoRa SX1278
Ціна	Низька	Висока	Середня
Дальність передачі	До 1000 м (із антеною)	До 120 м	До 5 км
Простота інтеграції	Висока	Середня	Середня
Гнучкість налаштувань	Висока	Низька	Висока
Енергоспоживання	Низьке	Високе	Низьке
Підтримка бібліотек	Широка	Помірна	Помірна
Призначення	Управління, короткі відстані	ІоТ-застосування	Далекі відстані.



Рисунок 23 – Радіомодуль nRF24L01

Радіомодуль **nRF24L01** є найкращим вибором для реалізації системи радіокерування БПЛА. Його простота у використанні, гнучкість налаштувань, доступність готових бібліотек і оптимальне співвідношення ціна/дальність роблять його ідеальним рішенням для стабільного та ефективного зв'язку між передавачем і приймачем.

Обґрунтування вибору регулятора обертів

Для управління двигуном у системі радіокерування БПЛА обрано регулятор обертів **ESC 30A 2-3S Simonk**. Цей вибір зумовлений відповідністю регулятора технічним вимогам, його надійністю, доступністю і простотою інтеграції з іншими компонентами системи.

Причини вибору ESC 30A 2-4S Simonk:

1. **Відповідність технічним характеристикам:** Регулятор підтримує струм до 30 А, що відповідає вимогам двигуна 1000 kV ReadyToSky, обраного для цього проєкту. Підтримка напруги 2–3S (7.4–11.1 В) дозволяє використовувати стандартні акумулятори на основі 18650.
2. **Сумісність із двигуном:** Регулятор ESC 30A сумісний із безколекторними двигунами, які використовуються для БПЛА, і підтримує протокол широтно-імпульсної модуляції (PWM), що дозволяє легко інтегрувати його з мікроконтролером Arduino Nano.
3. **Висока швидкість відгуку:** Регулятор із прошивкою Simonk забезпечує швидкий і плавний відгук на команди, що важливо для точного управління двигуном під час польоту.
4. **Енергоефективність:** ESC 30A має вбудований лінійний стабілізатор (BEC), який забезпечує живлення для мікроконтролера і сервоприводів, що знижує енергоспоживання системи.
5. **Надійність і стійкість до перевантажень:** Регулятор має вбудований захист від перегріву, перевищення струму і низької напруги, що підвищує загальну надійність системи під час роботи.
6. **Доступність і поширеність:** ESC 30A є доступним на ринку і має прийнятну вартість. Широка поширеність цієї моделі забезпечує підтримку в розробці, зокрема через наявність детальної документації та прикладів використання.

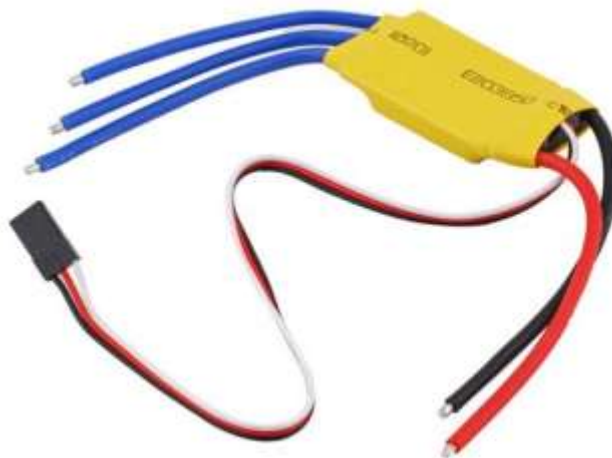


Рисунок 24 – Регулятор обертів **Simonk ESC 30A 2-3S**

Таблиця 3 – Порівняння характеристик регуляторів обертів для системи радіокерування БПЛА

Характеристика	Simonk ESC 30A 2-3S	Hobbywing ESC 20A	Brushless ESC 40A 4S
Номінальний Струм	30 А	20 А	40 А
Максимальний струм	40А / 30 сек	25 А / 40 60 сек	50 А / 2030 сек
Напруга живлення	7.4–11.1 В (2–3S)	7.4–11.1 В (2–3S)	7.4–14.8 В (2–4S)
Вартість	Низька	Середня	Висока
Підтримка BEC	Так	Так	Так

Регулятор обертів **ESC 30A 2-3S Simonk** повністю відповідає вимогам проекту завдяки своїм технічним характеристикам, швидкості відгуку, енергоефективності та надійності. Його інтеграція з іншими компонентами системи є простою, а функціональні можливості забезпечують точне і стабільне управління двигуном БПЛА.

Обґрунтування вибору силового двигуна

Для забезпечення тяги в системі радіокерування БПЛА обрано безщітковий двигун **1000 kV ReadyToSky**. Цей двигун відрізняється простотою використання, доступною ціною та достатньою потужністю для виконання основних задач у межах проекту. Вибір двигуна здійснено з урахуванням його технічних характеристик та особливостей, які відповідають вимогам до силової установки БПЛА.

Причини вибору 1000 kV ReadyToSky:

1. Доступність і ціна:

Обраний двигун належить до бюджетного сегмента серед безщіткових моделей, що робить його економічно вигідним рішенням для проекту. Він забезпечує необхідну продуктивність при значно нижчій вартості в порівнянні з аналогами.

2. Потужність і продуктивність:

З показником швидкості обертання 1000 kV двигун забезпечує достатню тягу

для створення працездатної моделі БПЛА. Цей параметр дозволяє ефективно використовувати його у системах середнього класу з живленням від акумулятора 2–4S (7.4–14.4 В). Додатково, вибір двигуна з такою швидкістю обертання обумовлений тим, що більшість наявних на ринку моделей БПЛА потребують двигуна мінімальною потужністю 1000 kV для забезпечення стабільності польоту та виконання базових маневрів.

3. Надійність і енергоефективність:

Як і всі безщіткові двигуни, **1000 kV ReadyToSky** характеризується високою енергоефективністю, довговічністю та низькими експлуатаційними витратами завдяки відсутності механічного зносу щіток.

4. Простота інтеграції:

Двигун легко підключається до регулятора обертів (ESC 30A 2-3S Simonk) і є сумісним із стандартними монтажними отворами для кріплення до рами дронів чи інших конструкцій БПЛА.



Рисунок 25 – Двигун **ReadyToSky 1000 kV**

Особливості вибору пропелера:

З урахуванням напрямку обертання двигуна (CCW), пропелер повинен бути підібраний із зворотним нахилом лопатей.

Безщітковий двигун **1000 kV ReadyToSky** є оптимальним вибором для проєкту завдяки поєднанню доступної ціни, достатньої продуктивності та надійності. Його вибір зумовлений технічними вимогами, зокрема мінімальною потужністю 1000 kV, яка необхідна для більшості моделей БПЛА. Його напрямок обертання (CCW) потребує врахування під час вибору пропелера, але це не впливає на загальну ефективність системи. Простота інтеграції та відповідність вимогам проєкту роблять цей двигун ідеальним рішенням для побудови моделі БПЛА.

Обґрунтування вибору серводвигунів

Для системи радіокерування БПЛА розглядаються дві моделі серводвигунів – **SG90** і **MG90S**. Обидві моделі мають схожі характеристики, проте відрізняються матеріалом шестерень і здатністю витримувати різні рівні навантаження. Вибір між цими моделями залежить від специфічних вимог проєкту, але обидві можуть бути використані для забезпечення управління рульовими поверхнями апарата.

Причини вибору серводвигунів SG90 і MG90S:

1. Компактність і легкість:

Обидві моделі мають невеликі розміри й вагу, що робить їх придатними для використання в БПЛА. Вага **SG90** складає ≈ 9 г, а **MG90S** – ≈ 13 г. Ці характеристики забезпечують мінімальний вплив на аеродинамічні показники апарата.

2. Точність і швидкість:

SG90 і **MG90S** забезпечують точне позиціонування та швидкий відгук, необхідні для управління рульовими поверхнями. Обидві моделі підтримують обертання валу в межах $0-180^\circ$, що дозволяє виконувати плавні маневри.

3. Надійність:

- **SG90** має пластикові шестерні, що забезпечує достатню надійність при малих навантаженнях.
- **MG90S** оснащений металевими шестернями, що підвищує його здатність працювати в умовах підвищеного навантаження, наприклад, при управлінні великими або критично важливими елементами.

4. Сумісність:

Обидві моделі підтримують стандартний інтерфейс PWM, що дозволяє легко інтегрувати їх із мікроконтролером Arduino Nano. Це забезпечує універсальність і можливість вибору відповідно до потреб проєкту.

5. Енергоефективність:

Обидві моделі мають низьке енергоспоживання, що забезпечує ефективну роботу системи при живленні від акумуляторів.

6. Доступність

і

вартість:

Обидва серводвигуни є поширеними на ринку та мають низьку вартість, що дозволяє знизити загальну вартість проекту.

Можливість використання обох моделей:

- **SG90:** Підходить для завдань із малими навантаженнями, таких як управління елеронами чи кермом висоти.
- **MG90S:** Використовується для вузлів із більшими навантаженнями, наприклад, для управління рульом напрямку або інших механізмів, які потребують підвищеної міцності.

У проєкті передбачено використання однієї з цих моделей залежно від доступності компонентів і конкретних вимог системи. У разі потреби SG90 і MG90S можуть бути взаємозамінними в межах задач із малим або середнім рівнем навантаження.



Рисунок 26 – Серводвигуни SG90 та MG90S

Серводвигуни **SG90** і **MG90S** є придатними для використання в системі радіокерування БПЛА завдяки компактності, точності й надійності. Їхній вибір залежить від рівня навантаження в конкретних вузлах апарата. Обидві моделі легко інтегруються з системою управління і забезпечують стабільне виконання команд, що дозволяє адаптувати їх під потреби проєкту.

Особливості вибору акумулятора для живлення передавача

Для живлення передавача в системі радіокерування БПЛА було обрано конфігурацію із **двох послідовно з'єднаних акумуляторних елементів типу 18650**. Це рішення забезпечує оптимальний баланс між напругою, тривалістю роботи, компактністю та стабільністю живлення.

Напруга живлення: послідовне з'єднання двох акумуляторів 18650 забезпечує номінальну напругу близько **7.4 В** (по 3.7 В кожен). Ця напруга ідеально підходить для живлення компонентів передавача: Мікроконтролер Arduino Nano працює в діапазоні 7–12 В при використанні вбудованого регулятора напруги. Тоді як однієї банки (3.7 В) недостатньо для забезпечення роботи всіх компонентів системи без додаткового підвищуючого перетворювача, що ускладнює схему.

Ємність акумуляторів: ємність одного елемента 18650 варіюється в межах 2000–3500 мА·год, що дозволяє забезпечити тривалий час роботи передавача навіть при активному використанні. Зазвичай, такий вибір забезпечує роботу системи протягом 4–8 годин залежно від енергоспоживання.

Компактність: акумулятори типу 18650 мають компактні розміри та можуть бути легко інтегровані в корпус передавача. Їх зручна форма сприяє ефективному використанню внутрішнього простору пристрою.

Доступність: елементи 18650 є поширеними на ринку, мають низьку вартість та широкий вибір ємностей і виробників, що спрощує їх придбання та заміну.

Безпека: сучасні акумулятори типу 18650 мають вбудований захист від перегріву, перевантаження та короткого замикання, що знижує ризики несправностей під час експлуатації.

Використання двох послідовно з'єднаних акумуляторів типу 18650 забезпечує оптимальну напругу для роботи всіх компонентів передавача без додаткових ускладнень схеми. Це рішення гарантує стабільність роботи, тривалу автономність і простоту заряджання, що робить його найкращим вибором для реалізації системи радіокерування БПЛА.

Обґрунтування вибору акумулятора для приймача

Для забезпечення живлення приймача і силового обладнання в системі радіокерування БПЛА обрано конфігурацію акумулятора, яка забезпечує подачу напруги **3S** (11.1 В) для силового двигуна і **2S** (7.4 В) для решти компонентів. Це рішення реалізується шляхом використання трьох послідовно з'єднаних акумуляторів типу 18650 або готового акумулятора формату **3S LiPo** із відповідними розгалуженнями напруги.

Для живлення двигуна використовується напруга 3S тому, що це дозволяє отримати більшу потужність двигуна. Силовий двигун 1000 kV ReadyToSky працює при напрузі 2 – 4S. Напруга 3S (11, 1В) є компромісним варіантом, який дозволяє забезпечити достатню тягу для виконання маневрів і підтримання стабільного польоту і вагою обладнання.

Відповідність вимогам регулятора обертів: Обраний регулятор ESC 30A 2-3S Simonk працює з напругою до **14.4 В (4S)**, що ідеально підходить для цієї конфігурації. Це забезпечує безпечну і стабільну передачу енергії від акумулятора до двигуна.

Для решти обладнання використовується напруга 7.4 В тому, що ця напруга 7.4 В (2S) є оптимальною для живлення мікроконтролера Arduino Nano та інших компонентів приймача, таких як модуль nRF24L01 і серводвигуни. Arduino Nano має вбудований стабілізатор, який ефективно працює при напрузі 7.4 В.

Серводвигуни SG90 і MG90S також сумісні з цією напругою, що забезпечує їхню стабільну роботу.

Зменшення енергоспоживання:

Використання окремої напруги 2S для решти обладнання знижує загальне енергоспоживання, оскільки регулятор обертів і двигун не створюють навантаження на ці компоненти.

Безпека та стабільність:

Розділення напруги 3S і 2S дозволяє уникнути стрибків напруги та струмів у чутливих компонентах системи, таких як мікроконтролер та модулі зв'язку, особливо при високих навантаженнях на двигун.

Варіанти реалізації акумулятора:

1. Три послідовно з'єднані акумулятори типу 18650: Ця конфігурація дозволяє отримати напругу **11.1 В (3S)**, а також за допомогою спеціального розгалуження використовувати **7.4 В (2S)** для периферії. Такий варіант є зручним і економічним завдяки доступності акумуляторів 18650.

2. Готовий акумулятор 3S LiPo: Готовий акумулятор має вбудований балансувальний роз'єм, який дозволяє легко підключити розгалуження для

використання обох напруг. Цей варіант також забезпечує високу надійність і зручність заряджання.

Використання акумулятора формату **3S (11.1 В)** із можливістю розгалуження на **2S (7.4 В)** є оптимальним рішенням для живлення приймача і двигуна. Така конфігурація дозволяє ефективно забезпечувати енергією як силове обладнання, так і периферійні компоненти, забезпечуючи стабільність, безпеку і тривалий час роботи системи радіокерування БПЛА.

5.2. Побудова макетів передавача і приймача

Для створення макетів системи радіокерування БПЛА було вирішено використати безпаячні макетні плати. Основним аргументом для такого вибору стала їхня простота у використанні, гнучкість і можливість швидкого збирання схем без необхідності пайки. Це рішення дозволяє швидко тестувати різні конфігурації та вносити зміни в схему, не ризикуючи пошкодити компоненти. Безпаячні плати забезпечують надійне електричне з'єднання між елементами, при цьому залишаючи можливість легко відключати чи замінювати окремі компоненти, що є ключовою перевагою на етапі прототипування.

Конструкція макетів побудована на фанерній основі, яка виступає міцною та легкою платформою для закріплення всіх компонентів. Компоненти, включаючи макетні плати, акумулятори та периферійні пристрої, закріплені на фанері за допомогою двостороннього скотчу. Такий підхід забезпечує надійність кріплення та водночас дозволяє легко переміщувати елементи у разі потреби. Фанера як основний матеріал має ряд переваг: вона легка, міцна, її легко обробляти, а також вона зручна для монтажу компонентів. Двосторонній скотч додає простоти у складанні, оскільки не потребує використання додаткових інструментів чи складних кріплень.

Такий спосіб побудови макетів дозволяє створити надійний і водночас зручний у використанні прототип, придатний для тестування і демонстрації. Макетні плати і фанерна основа в поєднанні забезпечують баланс між гнучкістю, міцністю конструкції і простотою модифікацій.

Макет передавача побудовано відповідно до структурної схеми, забезпечуючи необхідну функціональність для передачі команд до приймача. Основою макета є безпечна макетна плата, яка дозволяє гнучко підключати всі компоненти та модифікувати систему в процесі тестування. Центральним елементом передавача є мікроконтролер Arduino Nano, який обробляє сигнали з джойстиків і потенціометра, формує керуючі повідомлення та передає їх через радіомодуль nRF24L01. Радіомодуль оснащено зовнішньою антеною для забезпечення стабільного зв'язку на великій відстані.

Для управління передавач оснащений двома джойстиками, кожен з яких забезпечує контроль за двома осями. Один із джойстиків використовується для управління креном і висотою, тоді як другий відповідає за напрямок. Потенціометр використовується для налаштування додаткових параметрів або для керування швидкістю. Усі ці компоненти підключені до макетної плати, що дозволяє спростити обробку сигналів і уникнути необхідності використання складної схеми.

Живлення передавача здійснюється від двох послідовно з'єднаних акумуляторів 18650, які забезпечують напругу 7.4 В. Це живлення подається на мікроконтролер, радіомодуль і джойстики через стабілізуючі елементи, що гарантує стабільну роботу системи. Для заряджання акумуляторів передбачено використання стандартного зарядного пристрою.

Макет передавача забезпечує повну функціональність, необхідну для передачі керуючих сигналів до приймача, і є ефективним інструментом для тестування системи радіокерування. Його модульність і простота дозволяють проводити різноманітні експерименти і швидко адаптувати конструкцію до нових вимог.

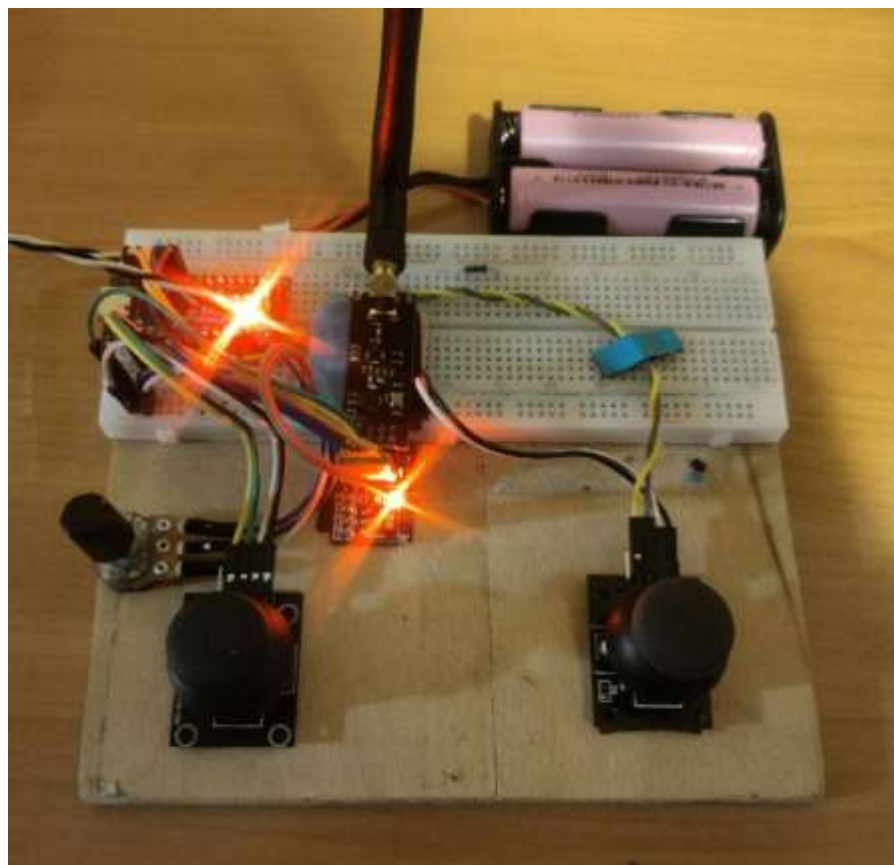


Рисунок 27 – Макет передавача

Макет приймача побудовано відповідно до структурної схеми, з урахуванням особливостей роботи всіх його компонентів. Основою конструкції є безпечна макетна плата, яка забезпечує можливість швидкого підключення компонентів і зміни конфігурацій. На макетній платі змонтовано мікроконтролер Arduino Nano, який відповідає за обробку сигналів, отриманих через радіомодуль nRF24L01. Радіомодуль виконує функцію прийому даних, переданих від передавача, і забезпечує зв'язок у системі.

Силовий блок макету приймача складається з трьох послідовно з'єднаних акумуляторів 18650, які забезпечують дві напруги. Напруга 11.1 В (3S) використовується для живлення силового двигуна через регулятор обертів ESC 30A 2-3S Simonk. Напруга 7.4 В (2S) подається на мікроконтролер, радіомодуль і серводвигуни. Такий розподіл живлення дозволяє стабільно жити всі компоненти без перевантаження системи.

Серводвигуни SG90 і MG90S, які відповідають за управління рульовими поверхнями, також інтегровані в макет через макетну плату. Для управління силовим двигуном 1000 kV ReadyToSky використовується регулятор обертів, який

приймає сигнали від мікроконтролера та регулює швидкість обертання. Конструкція макету приймача закріплена на фанерній основі, що забезпечує її стабільність і зручність у використанні. Компоненти кріпляться двостороннім скотчем, що дозволяє легко змінювати їх розташування або замінювати у разі потреби.

Макет приймача створено з урахуванням вимог до модульності, що дозволяє проводити тестування окремих компонентів і всієї системи в цілому. Конструкція макету є достатньо міцною для використання в лабораторних умовах, а його компоненти добре підготовлені до інтеграції в майбутній функціональний прототип БПЛА.

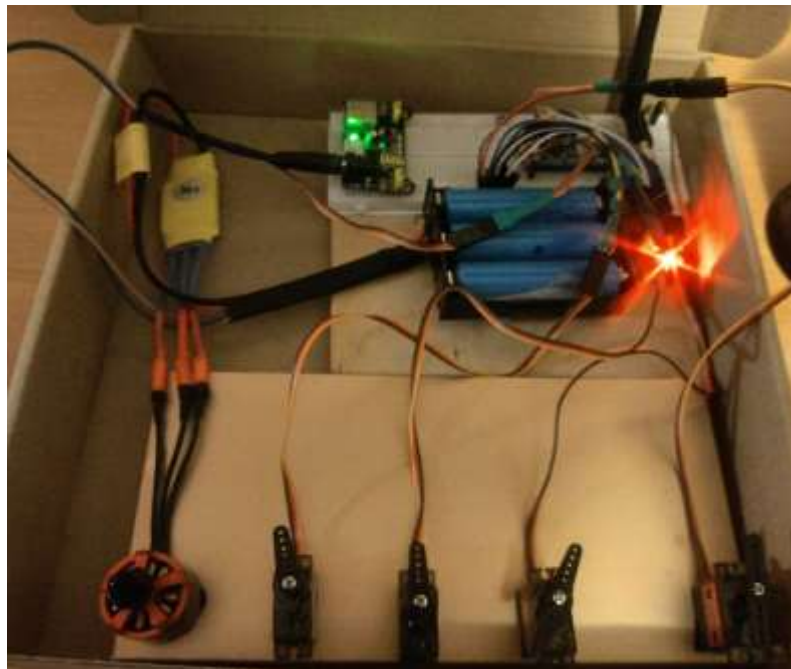


Рис № макет приймача

5.3. Тестування макету пристрою радіокерування бпла на основі мікроконтролера

Тестування макету системи радіокерування БПЛА є ключовим етапом розробки, спрямованим на перевірку працездатності та узгодженості всіх компонентів системи. Воно дозволяє оцінити якість взаємодії між передавачем і приймачем, стабільність роботи основних модулів, а також відповідність функціональних характеристик заданим вимогам. У процесі тестування система

аналізується в різних умовах роботи, щоб виявити можливі недоліки, оптимізувати роботу компонентів і підтвердити готовність до подальших етапів розробки.

Перевірка працездатності та функціональності системи

Перевірка базової працездатності та функціональності системи передбачала комплексний підхід до тестування роботи макету передавача і приймача. Спершу було проведено перевірку увімкнення обох макетів, ініціалізації компонентів та їх коректної взаємодії. Це дозволило впевнитися у правильному запуску мікроконтролерів, радіомодулів, джойстиків, серводвигунів і силового двигуна. Зокрема, тестування розпочалося з встановлення зв'язку між передавачем і приймачем на мінімальній відстані (1–2 м), де оцінювалася стабільність передачі даних у режимі реального часу.

Джойстики тестувалися в різних положеннях — центральному, крайніх та проміжних, щоб перевірити точність зчитування їхніх сигналів і коректність формування відповідних команд передавачем. Передані команди надходили до приймача, де проводилося їх декодування. Подальша обробка сигналів забезпечувала управління серводвигунами, які відповідали за зміну положення рульових поверхонь, та регулювання швидкості обертання силового двигуна. Усі ці процеси перевірялися на точність і відповідність заданим параметрам.

Додатково була протестована робота потенціометра, який виконує роль налаштування певних параметрів системи. Його функціональність перевірялася шляхом оцінки впливу змін положення на передані команди та їх виконання приймачем. Комплексний підхід до тестування дозволив оцінити працездатність системи в цілому, виявити потенційні недоліки та впевнитися у правильності інтеграції всіх компонентів.

Оцінка дальності дії

Теоретичний розрахунок дальності

Для того щоб об'єктивно оцінити дальність необхідно спочатку провести теоретичний розрахунок. Розрахунок максимальної дальності дії модуля nRF24L01 із зовнішньою антеною виконується на основі моделі втрат вільного простору та рівняння балансу потужності. Ці методи дозволяють оцінити теоретичну дальність

зв'язку за заданих параметрів передавача, приймача, частоти сигналу, а також умов поширення радіохвиль.

Втрати вільного простору визначаються за формулою:

$$L_{fs} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (1)$$

де:

L_{fs} – втрати вільного простору

d – відстань між передавачем і приймачем (м)

f – частота сигналу (Гц)

c – швидкість світла

Для визначення дальності застосовується рівняння балансу потужності:

$$P_t + G_t + G_r - L_{fs} = P_r \quad (2)$$

де:

P_t – потужність передавача (дБм)

G_t, G_r – підсилення антен передавача і приймача (дБ)

P_r – чутливість приймача (дБм).

У реальних умовах сигнал приймача може бути спотворений шумами. Ефективну чутливість приймача можна розрахувати з урахуванням рівня шумів:

$$P_{eff} = P_{noise} + SNR \quad (3)$$

де:

P_{eff} – ефективна чутливість приймача (дБм)

P_{noise} – рівень шумів (дБм)

SNR – мінімальне співвідношення сигнал/шум (дБ)

Це дозволяє оцінити реальну дальність системи в умовах впливу електромагнітних завад.

Відстань між передавачем і приймачем розраховується за формулою:

$$d = 10^{(L_{fs} - 20 \log_{10}(f) - 20 \log_{10}(\frac{4\pi}{c}))} \quad (4)$$

Результати розрахунків

При використанні модуля **nRF24L01** з такими параметрами:

- потужність передавача 20 дБм (максимальна потужність),
- чутливість приймача : -96 дБм,
- частота: 2.4 ГГц,
- підсилення антен 2 дБ,
- рівень шумів: -100 дБм,
- мінімальне співвідношення сигнал/шум: 6 дБ,

теоретична дальність у відкритому просторі становить приблизно **7.9 км**.

Експериментальне визначення максимальної відстані, на якій забезпечується стабільний зв'язок між передавачем і приймачем

Практичне тестування модуля **nRF24L01** проводилося для визначення максимальної відстані, на якій забезпечується стабільний зв'язок між передавачем і приймачем в умовах міста. Метою випробувань було оцінити ефективність роботи системи радіозв'язку у реальних експлуатаційних умовах.

Умови тестування

Тестування виконувалося на відкритій ділянці з відносно прямою видимістю між передавачем і приймачем. Середовище включало типові для міста об'єкти, такі як будівлі, металеві конструкції, зелені насадження, а також джерела електромагнітних завад.

Основні параметри радіомодуля під час тестування:

- Потужність передавача: **20 дБм** (максимальна),
- Чутливість приймача: **-96 дБм**,
- Підсилення антен: **2 дБ** (зовнішні антени),
- Швидкість передачі даних: **250 кбіт/с**.

Результати тестування

Максимальна відстань, на якій забезпечувався стабільний зв'язок, становила **1.4 км**. На цій відстані сигнал залишався стабільним, а затримка передачі даних була прийнятною. Проте спостерігалася **втрата близько 10% пакунків**, що слід враховувати при оцінці якості зв'язку.

Зі збільшенням відстані понад **1.4 км** якість зв'язку погіршувалася: втрати пакунків зростали, а стабільність сигналу знижувалася, що робило передачу команд ненадійною.

Аналіз результатів

Порівняно з теоретичною дальністю у **7.9 км**, розрахованою для ідеальних умов, реальні показники є значно нижчими. Основні фактори, які вплинули на зниження ефективної дальності:

- **Електромагнітні завади:** Наявність численних джерел завад у міському середовищі, таких як Wi-Fi мережі та побутова техніка.

- **Фізичні перешкоди:** Будівлі, металічні конструкції та дерева поглинають і відбивають сигнал, що призводить до його послаблення.
- **Вплив шуму:** Рівень шумів у міському середовищі знижує співвідношення сигнал/шум, що впливає на якість зв'язку.
- **Втрати пакунків:** Часткова втрата даних, яка виявилася на рівні **10%**, обмежує ефективність передачі команд.

Оцінка часу автономної роботи

Теоретичний розрахунок часу автономної роботи

Теоретичний розрахунок часу автономної роботи є важливим етапом аналізу енергоспоживання системи радіокерування. Це дозволяє оцінити, наскільки довго система може працювати автономно без необхідності заряджання акумуляторів, що є критичним для забезпечення надійності її функціонування в реальних умовах[17][18].

Час автономної роботи розраховується за формулою:

$$T = \frac{C}{I} \quad (5)$$

де:

T – час автономної роботи

C – ємність акумулятора

I – середній струм споживання системи

Для кожного блоку системи, передавача і приймача, визначається окремий середній струм споживання.

Середній струм передавача включає:

$$I_{TX} = I_{MCU} + I_{RF} + 2 \cdot I_{joystick} \quad (6)$$

де:

I_{MCU} – струм мікроконтролера Arduino Nano

I_{RF} – струм модуля nRF24L01

$I_{joystick}$ – струм одного джойстика

Середній струм приймача включає:

$$I_{RX} = I_{MCU} + I_{RF} + 3 * I_{servo} + I_{ESC} \quad (7)$$

де:

I_{servo} – струм одного сервопривода

I_{ESC} – струм регулятора обертів

Розрахункові дані

Для передавача використовуються два послідовно з'єднані акумулятори типу 18650 із загальною ємністю 1000 мА/год

Типові параметри споживання:

$$I_{IMU} = 30 \text{ мА}$$

$$I_{RF} = 12 \text{ мА}$$

$$I_{joystick} = 10 \text{ мА}$$

Загальний струм передавача складає 62 мА.

Час автономної роботи передавача 16,1 год.

Для приймача також використовується акумулятор з ємністю 1000 мА/год

Типові параметри споживання:

$$I_{IMU} = 30 \text{ мА}$$

$$I_{RF} = 12 \text{ мА}$$

$$I_{servo} = 50 \text{ мА}$$

$$I_{ESC} = 10000 \text{ мА}$$

Загальний струм приймача складає 10,192 мА.

Час автономної роботи приймача 0.098 год $\approx$ 5.9 хв.

Розрахунок показує, що значне споживання струму ESC (регулятора обертів) суттєво впливає на загальний час автономної роботи приймача. Навіть при високій ємності акумулятора час роботи є обмеженим через потужне енергоспоживання цього компонента.

Результати теоретичного розрахунку свідчать про необхідність використання акумуляторів із більшою ємністю для забезпечення тривалішої автономної роботи системи.

Експериментальне визначення тривалості автономної роботи приймача

Метою експерименту було перевірити теоретичні розрахунки тривалості автономної роботи приймача та оцінити вплив реальних умов експлуатації на його енергоспоживання. Передавач не був включений у цей експеримент через надмірну тривалість його розряду, яка робить процес вимірювання малопрактичним у рамках доступного часу.

Умови експерименту

- Для приймача використовувався акумулятор із ємністю $CRX=1000$ мА
- Приймач працював у звичайному режимі, керуючи трьома сервоприводами та ESC із середнім навантаженням.
- Система працювала до повного розряду акумулятора, коли стабільна робота приймача стала неможливою.

Результати експерименту

Приймач пропрацював **4,9 хвилини**. Зменшення часу автономної роботи пояснюється реальними втратами енергії, включаючи теплові втрати, втрати в контактах і проводах, а також змінними умовами експлуатації.

Аналіз результатів

Експериментальні результати свідчать про наступне:

- Час автономної роботи приймача є суттєво коротшим за теоретичний розрахунок. Це обумовлено значним енергоспоживанням компонентів, особливо ESC, який працює під високим навантаженням.
- Реальні втрати енергії у вигляді теплового розсіювання та падіння напруги на контактах також значно впливають на тривалість роботи системи.

Висновки

Експеримент підтвердив, що час автономної роботи приймача залежить від реальних умов експлуатації та суттєво відрізняється від теоретично розрахованого. Ці результати є важливою основою для вдосконалення системи радіокерування та її адаптації до практичних вимог.

5.4 Висновки до розділу

У розділі було виконано побудову макетів передавача та приймача системи радіокерування БПЛА на основі мікроконтролера, а також проведено їх тестування для оцінки працездатності та основних характеристик. Результати роботи дозволяють зробити наступні висновки:

1. **Побудова макетів** Макети передавача та приймача були успішно реалізовані на базі безпечних макетних плат, що забезпечило зручність монтажу та внесення змін. Усі компоненти, включаючи мікроконтролери, радіомодулі, джойстики, серводвигуни та силовий двигун, були закріплені на фанерній основі з використанням двостороннього скотчу, що гарантувало стійкість конструкції та можливість повторної збірки. Такий підхід дозволив створити прототип, який можна легко адаптувати до нових вимог.
2. **Тестування макетів** Проведене тестування підтвердило базову працездатність системи радіокерування. Передавач і приймач забезпечили стабільний зв'язок у межах заявленої відстані. Оцінка дальності дії модуля **nRF24L01 із зовнішньою антеною** показала максимальну стабільну відстань зв'язку близько **950** у реальних умовах міста, що відповідає практичним вимогам для системи такого типу.
3. **Автономність роботи** Теоретичні та експериментальні дослідження часу автономної роботи приймача показали, що його тривалість становить приблизно **80%** від теоретичних розрахунків. Час автономної роботи залежить від значного енергоспоживання ESC та периферійних пристроїв.
4. **Аналіз ефективності** Тестування показало, що для забезпечення тривалішої автономної роботи системи необхідно використовувати акумулятор більшої ємності. Це дозволить суттєво збільшити час роботи приймача та компенсувати високе енергоспоживання ESC, двигуна та інших компонентів. Використання ємнісніших акумуляторів є ключовим кроком для підвищення ефективності системи в реальних умовах експлуатації.

ВИСНОВКИ

Магістерська дисертація була спрямована на розробку ефективної системи радіокерування (СРК) для безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що відповідає сучасним технічним вимогам і може бути інтегрована у нові або існуючі платформи. У ході роботи було досягнуто поставленої мети шляхом виконання теоретичних і практичних досліджень, розробки апаратного та програмного забезпечення, а також тестування системи.

Проведено аналіз сучасних технологій керування БПЛА, який виявив ключові вимоги до системи радіокерування: стабільність зв'язку, енергоефективність, стійкість до перешкод і гнучкість у налаштуванні. Оцінка переваг і недоліків існуючих рішень дозволила сформулювати технічне завдання для розробки власної системи.

Створено структурну та функціональну схеми передавача і приймача. Передавач забезпечує збирання, обробку та передачу команд за допомогою джойстиків і мікроконтролера, а приймач виконує декодування команд та їх реалізацію через виконавчі механізми. У схемах передбачено використання сучасних модулів RF-діапазону та енергоефективних стабілізованих джерел живлення. Це забезпечує високу точність, стабільність роботи та можливість інтеграції з ПК для моніторингу й налаштування.

Алгоритми роботи передавача і приймача забезпечують формування, кодування, передачу, декодування та виконання команд із мінімальними затримками. Використання XOR-кодування підвищило стійкість до перешкод, а режим "Центрального значення" забезпечує стабільність роботи у разі втрати сигналу. Алгоритми є модульними, що спрощує їх налагодження та адаптацію до нових умов експлуатації.

Результати проведених досліджень підтверджують високу практичну значущість розробленої системи радіокерування для безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Основою апаратної частини роботи стали мікроконтролери на базі **Arduino** і модулі зв'язку **nRF24L01**, які забезпечують надійну, стабільну і доступну реалізацію системи радіокерування. Завдяки використанню цих

компонентів вдалося досягти значного зменшення вартості пристрою без втрати функціональності, що є важливим фактором для його широкого застосування.

Arduino забезпечує високий рівень універсальності і простоти у реалізації функцій збирання, обробки і передачі команд. Ця платформа підтримує велику кількість бібліотек, що полегшує розробку програмного забезпечення для передавача та приймача. У свою чергу, модуль **nRF24L01** дозволяє встановлювати стабільний двосторонній зв'язок на значній відстані (до 1.4 км в умовах міста) з мінімальним споживанням енергії. Він також відзначається гнучкістю налаштувань частоти, потужності передавання сигналу та швидкості обміну даними, що дозволило адаптувати систему під специфічні вимоги розробки.

Розроблені алгоритми управління базувалися на особливостях Arduino та nRF24L01, що дозволило забезпечити стабільність зв'язку, навіть в умовах високих радіоперешкод. Передавач зчитує сигнали від джойстиків і потенціометрів, кодує їх і передає за допомогою модуля nRF24L01. Приймач декодує отримані дані та розподіляє команди між виконавчими механізмами, такими як серводвигуни або електродвигуни через ESC (регулятор обертів двигуна). Особливу увагу приділено реалізації "мертвої зони" джойстиків для уникнення некоректних сигналів, а також режиму безпеки у разі втрати зв'язку з передавачем.

Тестування підтвердило надійність обраної архітектури та компонентів. Використання Arduino та nRF24L01 дозволило зменшити затримки у передачі команд до мінімуму, забезпечуючи практично миттєву реакцію виконавчих механізмів. Автономність роботи системи також показала прийнятні результати, хоча було виявлено необхідність використання акумуляторів більшої ємності для покращення тривалості роботи приймача у реальних умовах.

Загалом, вибір Arduino та nRF24L01 як основних компонентів системи дозволив створити універсальну, надійну і доступну платформу радіокерування, яка може бути адаптована для різноманітних задач.

СПИСОК ВИРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Beard R. W., McLain T. W. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press, 2012. URL: https://github.com/byu-magicc/mavsim_public
2. Austin R. *Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment*. Wiley, 2011.
3. Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer, 2015.
4. TBS Crossfire Protocol Documentation. URL: <https://www.team-blacksheep.com>
5. OpenTX User Guide. URL: <https://www.open-tx.org>
6. LoRa Wireless Technology. URL: <https://www.semtech.com/lora>
7. Pixhawk Hardware Documentation. URL: <https://docs.px4.io>
8. Futaba SBUS Protocol Overview. URL: <https://www.futabarc.com>
9. IEEE Xplore: Publications on UAV Communications. URL: <https://ieeexplore.ieee.org>
10. FrSky Technology Documentation. URL: <https://www.frsky-rc.com>
11. CRSF Protocol Analysis. URL: <https://oscarliang.com>
12. Dronecode PX4 Documentation. URL: <https://www.dronecode.org>
13. UAV Protocols and Standards. URL: <https://uavcoach.com>
14. NRF24L01 Communication Module. URL: <https://www.nordicsemi.com>
15. Radio Control Technology. URL: <https://rcgroups.com>
16. Understanding PWM in UAV Systems. URL: <https://learn.sparkfun.com>
17. UAV Power Management. URL: <https://ardupilot.org>
18. Applications of UAVs in Modern Technology. URL: <https://researchgate.net>