

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: *Комп'ютерна система багатофункціонального керування
роботизованими платформами*

Виконав: студент 4 курсу, групи СІ-42
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Герасименко А.Є.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Лецишин Ю.З.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Тиш Є.В.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Осухівська Г.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Михалик Д.М.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«25» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студента Герасименка Андрія Євгеновича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерна система багатофункціонального керування
роботизованими платформами

Керівник роботи к. т. н. Лецишин Юрій Зіновійович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » квітня 2026 року № 4/9-188

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16.06.2026р

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Обґрунтування актуальності розробки власної апаратури керування для безпілотних систем та робототехніки.

1. Аналіз технічного завдання.

2. Проєктна частина.

3. Практична частина.

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Схема електрична структурна комп'ютерної системи (КС КРБ 123.170.00.00 Е1).

Схема електрична принципова комп'ютерної системи (КС КРБ 123.170.00.00 Е3).

Блок-схема алгоритму роботи комп'ютерної системи (КС КРБ 123.170.00.01).

UML-діаграма станів роботи комп'ютерної системи (КС КРБ 123.170.00.02).

UML-діаграма компонентів комп'ютеризованого комплексу (КС КРБ 123.170.00.00 С1).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Сенчишин В. С. к.т.н., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 25.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розробка технічного завдання</i>	<i>26.01 – 02.02</i>	
2.	<i>Робота над першим розділом «АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ»</i>	<i>03.02 – 15.02</i>	
3.	<i>Робота над другим розділом «ПРОЄКТНА ЧАСТИНА»</i>	<i>20.04 – 25.04</i>	
4.	<i>Робота над третім розділом «ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА»</i>	<i>26.04 – 05.05</i>	
5.	<i>Робота над четвертим розділом «БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ. ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ»</i>	<i>07.05 – 25.05</i>	
6.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>26.05 – 07.06</i>	
7.	<i>Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами</i>	<i>08.06 – 19.06</i>	
8.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>18.06 – 22.06</i>	
9.	<i>Захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>23.06.2026р.</i>	

Студент

_____ (підпис)

Герасименко А.Є.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Лецишин Ю.З.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Герасименко А.Є. Комп'ютерна система багатофункціонального керування роботизованими платформами: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра: спец. 123 — комп'ютерна інженерія. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2026.

Ключові слова: комп'ютерна система, багатофункціональне керування, роботизована платформа, дистанційний пульт, мікроконтролер STM32 [36, 37, 38], бездротовий зв'язок, радіомодуль, Altium Designer.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці апаратно-програмного комплексу багатофункціонального пульта дистанційного керування для безпілотних апаратів та роботизованих платформ. В процесі виконання роботи спроектовано принципову електричну схему та розведено друковану плату в середовищі Altium Designer [25] на базі мікроконтролера STM32 [36, 37, 38]. Апаратна частина включає інтеграцію радіомодуля NRF24L01, OLED-дисплея, аналогових маніпуляторів та підсистеми автономного живлення з балансуванням літій-іонних акумуляторів. Розроблено програмне забезпечення мікроконтролера, що забезпечує точне зчитування координат, обробку сигналів та стабільну двосторонню передачу керуючих команд і телеметрії по радіоканалу. Створена система забезпечує надійне керування та має можливості для подальшого масштабування.

ANNOTATION

Herasymenko A. Ye. Computer System for Multifunctional Control of Robotic Platforms: Bachelor's Graduation Thesis: speciality 123 — computer engineering. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2026.

Keywords: computer system, multifunctional control, robotic platform, remote controller, STM32 microcontroller, wireless communication, radio module, Altium Designer.

The qualification work is devoted to the development of a hardware and software complex of a multifunctional remote controller for unmanned vehicles and robotic platforms. During the work, a schematic circuit was designed and a printed circuit board was routed in the Altium Designer [24] environment based on the STM32 microcontroller. The hardware part includes the integration of the NRF24L01 radio module, an OLED display, analog manipulators, and an autonomous power subsystem with lithium-ion battery balancing. The microcontroller software was developed to ensure accurate coordinate reading, signal processing, and stable two-way transmission of control commands and telemetry via a radio channel. The created system provides reliable control and has capabilities for further scaling.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ	10
1.1 Технічні характеристики та аналіз архітектури промислових систем радіокерування на прикладі Radiomaster TX12 МК2.....	10
1.2 Аналіз сучасних протоколів бездротового зв'язку, прошивок та відкритих стандартів передачі даних.....	14
1.3 Обґрунтування розробки комп'ютерної системи багатофункціонального керування відкритої архітектури	15
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА.....	18
2.1 Розробка структури комп'ютерної системи багатофункціонального керування роботизованими платформами.....	18
2.2 Обґрунтування вибору та технічні характеристики ключових апаратних компонентів	20
2.2.1 Вибір мікроконтролера STM32F103C8T6	20
2.2.2 Вибір радіомодуля NRF24L01+PA+LNA	21
2.2.3 Вибір мікроконтролера STM32F103C8T6	22
2.3 Створення та аналіз схеми електричної принципової пульта керування.....	22
2.4 Опис цифрових шин та послідовних протоколів обміну даними периферії.....	26
2.5 Опис алгоритму функціонування комп'ютерної системи керування	27
2.6 UML-діаграма станів роботи системи	27

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Герасименко А.Є.				Комп'ютерна система багатофункціонального керування роботизованими платформами Пояснююча записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Лецишин Ю.З.					Н	6	1
Реценз.	Михалик Д.М.					ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42		
Н. Контр.	Тиш Є.В.							
Затверд.	Осухівська Г.М.							

2.7	UML-діаграма компонентів комп'ютеризованого комплексу	27
2.8	Опис використовуваних програмних бібліотек.....	27
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА		36
3.1	Покрокове підключення, апаратне налаштування та макетування модулів периферії.....	36
3.2	Детальний аналіз та програмна реалізація коду керування мікроконтролера.....	38
3.3	Комплексне інженерне тестування, результати фізичного складання та моделювання.....	41
РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ. ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ..		46
4.1	Вентиляція при паянні плат	46
4.2	Захист від електромагнітного випромінювання	47
ВИСНОВКИ.....		50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		52
Додаток А Технічне завдання		
Додаток Б Перелік елементів		
Додаток В Лістинг коду		

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

BMS – Battery Management System

DMA – Direct Memory Access

FDM – Fused Deposition Modeling

I2C – Inter-Integrated Circuit

OLED – Organic Light-Emitting Diode

PETG – Polyethylene Terephthalate Glycol

SPI – Serial Peripheral Interface

SWD – Serial Wire Debug

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач

БПЛА – Безпілотний літальний апарат

ШИМ – Широтно-імпульсна модуляція

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						8
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Стрімкий розвиток робототехніки безпілотних апаратів та автоматизованих систем у сучасному світі диктує нові вимоги до засобів їх дистанційного керування. Сучасні роботизовані платформи що використовуються як у цивільних так і в спеціалізованих галузях вимагають забезпечення надійного стійкого до завад і багатофункціонального каналу зв'язку між оператором та керованим пристроєм[23, 24].

Існуючі на ринку універсальні пульти керування часто мають закриту архітектуру програмного та апаратного забезпечення що робить їх модифікацію під специфічні інженерні завдання складною або економічно недоцільною. Комерційні рішення часто перевантажені зайвим функціоналом що знижує їхню загальну надійність та збільшує енергоспоживання.

Відтак виникає потреба у створенні власної повністю відкритої комп'ютерної системи керування яка б поєднувала високу точність маніпуляторів стійкість радіоканалу та гнучкість налаштувань.

Актуальність теми полягає у необхідності створення адаптивної недорогої та надійної апаратури дистанційного керування що базується на сучасних мікроконтролерних системах.

Розробка власного пульта керування з використанням тридцятидвобітних мікроконтролерів сімейства та цифрових трансиверів дозволяє повністю контролювати процес формування та передачі телеметрії а також оптимізувати габаритні та енергетичні показники пристрою.

Процес розробки включає проєктування електричної схеми створення корпусу та написання програмного коду з використанням апаратного керування пам'яттю. Розроблена система може слугувати базовою платформою для подальшого розширення та інтеграції в різноманітні проєкти безпілотних апаратів та наземних робототехнічних комплексів[10].

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Технічні характеристики та аналіз архітектури промислових систем радіокерування на прикладі Radiomaster TX12 МК2

У сучасному секторі безпілотних технологій та мобільних роботизованих комплексів золотим стандартом серед промислових апаратів керування компактного класу вважається пульт Radiomaster TX12 МК2. Дана апаратура розроблена для забезпечення високої точності передачі команд і є класичним прикладом поєднання ергономічного корпусу типу геймпад із потужним внутрішнім обчислювальним ядром. Проведення детального технічного аналізу архітектури цього пристрою є необхідним етапом для укладання вимог до власної розроблюваної системи.

Головним обчислювальним процесором пульта Radiomaster TX12 МК2 виступає високопродуктивний 32-бітний мікроконтролер сімейства STM32F407[37, 38] зображено на рисунку 1.1, який працює під керуванням спеціалізованої операційної системи реального часу. Апаратура оснащена монохромним рідкокристалічним дисплеєм з роздільною здатністю сто двадцять вісім на шістьдесят чотири пікселі, що дозволяє виводити текстову та графічну інформацію про стан системи, рівень сигналу та напругу живлення.

Для зчитування дій оператора використовуються високоточні маніпулятори на датчиках Холла. Принцип дії таких маніпуляторів базується на ефекті Холла, який полягає у вимірюванні напруженості магнітного поля, що змінюється пропорційно куту відхилення осі джойстика. Таке інженерне рішення повністю виключає фізичне тертя контактів, що є головною причиною зносу та появи "шумів" у класичних резистивних потенціометрах, які використовуються у бюджетних пультах. Відсутність механічного тертя

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Герасименко А.Є.			<i>Комп'ютерна система багатофункціонального керування роботизованими платформами Пояснююча записка</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Лецишин Ю.З.				Н	10	8
<i>Реценз.</i>		Михалик Д.М.				<i>ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42</i>		
<i>Н. Контр.</i>		Тиш Є.В.,						
<i>Затверд.</i>		Осухівська Г.М.						

гарантує збереження ідеальної точності центрування стіків протягом усього терміну експлуатації апаратури.



Рисунок 1.1 – Головний обчислювальний процесор STM32F407VET6

Внутрішній радіочастотний тракт пульта у версії ELRS побудований на базі високочастотного трансивера Semtech SX1280[22], який працює в неліцензованому міжнародному діапазоні дві цілих чотири десятих гігагерца. Цей чіп підтримує передову модуляцію LoRa, що забезпечує колосальну стійкість до завад та рекордну дальність зв'язку при відносно невеликій потужності випромінювання.

Максимальна вихідна потужність вбудованого модуля становить двісті п'ятдесят міліват, що дозволяє стабільно керувати роботизованими платформами на відстані кількох кілометрів навіть в умовах складного рельєфу. Підсистема живлення промислового пристрою реалізована від двох високострумних літій-іонних елементів формату 18650[28, 31] загальною номінальною напругою сім цілих чотири десятих вольт. Для зручності користувача розробники інтегрували складний контролер живлення з можливістю внутрішнього балансувального заряджання акумуляторів через сучасний інтерфейс Type-C.

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

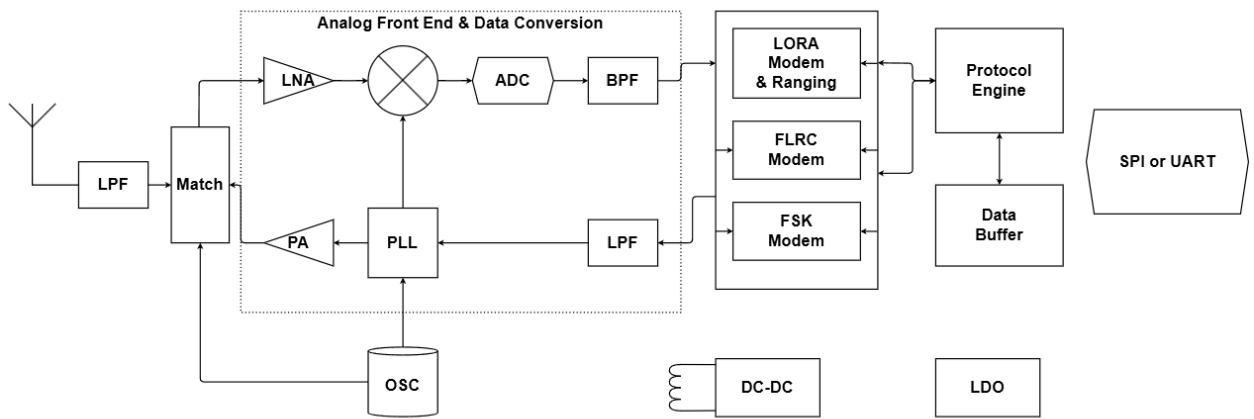


Рисунок 1.2 – Архітектурна блок-схема радіочастотного трансивера Semtech SX1280

Внутрішня архітектура даного трансивера (Рисунок 1.2) включає в себе повноцінний аналоговий фронт-енд (AFE), блок цифрової обробки сигналів та спеціалізовані апаратні модеми для різних типів модуляції (LoRa, FLRC, FSK). Наявність таких апаратних блоків дозволяє виконувати складні математичні перетворення радіосигналу без використання ресурсів головного мікроконтролера пульта.

Важливою архітектурною особливістю Radiomaster TX12 MK2 є наявність на задній панелі корпусу стандартного відсіку розширення типу JR Micro. Цей апаратний інтерфейс містить контакти живлення, заземлення та сигнальні лінії високошвидкісного послідовного порту UART. Наявність такого роз'єму дозволяє підключати до пульта потужні зовнішні далекобійні передавальні модулі різних частотних діапазонів дев'яцот п'ятнадцять або чотириста тридцять три мегагерци.

Незважаючи на беззаперечні переваги, промисловий пульт Radiomaster який зображений на рисунку 1.3 має суттєві недоліки для специфічних інженерних завдань. До них належать висока комерційна вартість, закритість певних апаратних вузлів, складність ремонту у польових умовах та надлишковість операційної системи для управління простими

роботизованими пристроями, що повністю обґрунтовує необхідність розробки власного відкритого аналога.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд пульта керування
Radiomaster TX12 MK2

Окрім внутрішньої обчислювальної архітектури, критично важливим елементом будь-якої промислової апаратури керування є антено-фідерний тракт[18, 33]. У розглянутому пульті використовується знімна всепрямована антена з лінійною поляризацією та коефіцієнтом підсилення близько двох децибел. Важливим аспектом при проектуванні систем радіокерування є врахування втрат на неузгодженість поляризації між антеною передавача та антеною приймача на роботизованій платформі.

У польових умовах, коли керований апарат виконує складні просторові маневри або рухається по пересіченій місцевості, кут між площинами

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

поляризації може досягати дев'яноста градусів. Це призводить до теоретичного падіння рівня прийманого сигналу на двадцять-тридцять децибел. Саме тому використання сучасних трансиверів з високим бюджетом каналу зв'язку є життєво необхідним для компенсації подібних динамічних просторових втрат і забезпечення безперервного потоку телеметрії.

1.2 Аналіз сучасних протоколів бездротового зв'язку, прошивок та відкритих стандартів передачі даних

Функціонування сучасних комп'ютеризованих комплексів радіокерування базується на глибокій взаємодії складних програмних прошивок та оптимізованих низькорівневих протоколів обміну даними. Головним програмним забезпеченням верхнього рівня для промислових пультів типу Radiomaster виступає відкрита операційна система EdgeTX[26]. Вона забезпечує гнучке налаштування мікшування каналів, обробку логічних перемикачів, виведення звукових сповіщень та підтримку скриптів мовою Lua для динамічної зміни польотних параметрів безпосередньо під час роботи пристрою. Однак використання такої важкої операційної системи вимагає значних обчислювальних ресурсів та великого об'єму флеш-пам'яті мікроконтролера.

На фізичному рівні бездротового зв'язку найбільш прогресивною технологією є протокол ExpressLRS. В основі радіочастотного тракту ELRS лежить технологія LoRa, яка використовує унікальний метод лінійної частотної модуляції Chirp Spread Spectrum. Суть цього методу полягає у використанні широкосмугових імпульсів з частотою, що безперервно змінюється. Це дозволяє приймачеві успішно декодувати корисний сигнал навіть тоді, коли його спектральна потужність знаходиться значно нижче загального рівня теплового шуму в ефірі. Така особливість забезпечує безпрецедентну стійкість до систем радіоелектронної боротьби та

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

багатопрменевої інтерференції. Крім того, протокол підтримує алгоритми виправлення помилок Forward Error Correction, які відновлюють пошкоджені біти без необхідності повторної передачі пакета.

Для передачі інформації між головним процесором пульта та зовнішніми радіомодулями використовується відкритий цифровий стандарт CRSF. Протокол CRSF[15, 22] працює через асинхронний послідовний інтерфейс UART на надзвичайно високих швидкостях, що стандартно становлять чотириста шістдесят кілобіт за секунду, а в турбо-режимі досягають трьох мегабіт за секунду. Структура цифрового пакета CRSF є суворо регламентованою. Кожен кадр починається з байта синхронізації та адреси пристрою, за якими слідує байт довжини корисного навантаження. Далі розміщується ідентифікатор типу пакета, який визначає, чи це є телеметрія, чи команди керування.

Самі канали керування пакуються у високій одинадцятибітній роздільній здатності. Завершується пакет байтом апаратної контрольної суми розрахованої за поліномом CRC8, що дозволяє приймачу миттєво відсікати пошкоджені внаслідок електромагнітних завад кадри.

1.3 Обґрунтування розробки комп'ютерної системи багатофункціонального керування відкритої архітектури

Проведений детальний аналіз промислових рішень та сучасних відкритих стандартів радіообміну дозволяє чітко сформулювати концепцію та обґрунтувати необхідність проєктування власної комп'ютерної системи керування роботизованими платформами[16, 17]. Створення відкритого пульта дистанційного керування на рівні безпосередньої роботи з апаратними регістрами (bare-metal) на базі 32-бітного мікроконтролера STM32F103C8T6 є раціональним інженерним рішенням. Такий підхід дозволяє поєднати ергономічні переваги промислових зразків із абсолютною гнучкістю власної

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

схемотехнічної розробки, повністю усуваючи обмеження, пов'язані із закритими екосистемами комерційних виробників.

Аналіз сучасних тенденцій у проектуванні людино-машинних інтерфейсів (Human-Machine Interface) показує, що геометричні та ергономічні параметри корпусу безпосередньо впливають на точність позиціонування виконавчих механізмів. Орієнтація на перевірені часом промислові стандарти класичної компоновки дозволяє задіяти біомеханічну оптимізацію органів керування. Симетричне розміщення двох аналогових маніпуляторів під великі пальці оператора забезпечує незалежний та інтуїтивний контроль просторових осей свободи роботизованої платформи, знижуючи втому кистей рук під час тривалої експлуатації. Розміщення групи дискретних тумблерів у верхній частині лицьової панелі створює умови для швидкого перемикання режимів функціонування, а інтеграція графічного OLED-дисплея в зоні периферичного зору гарантує миттєве зчитування критично важливої телеметрії без повної втрати візуального контакту з керованим об'єктом.

Перехід до архітектури bare-metal має ряд беззаперечних переваг для вузькоспеціалізованих систем керування реального часу. Використання мікроконтролера без громіздкої операційної системи дозволяє досягти стовідсотково детермінованого часу виконання коду. Це означає, що реакція системи на фізичну зміну положення джойстика або перемикання дискретного тумблера буде оброблятися через апаратні переривання за суворо визначений час, що вимірюється в десятках мікросекунд. У системах на базі операційних систем загального призначення завжди присутні непередбачувані затримки (джиттер) на перемикання контексту планувальником задач, що може стати критичним фактором при керуванні швидкісними апаратами. Прямий апаратний підхід забезпечує безперервну роботу аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера в тісному зв'язку з контролером прямого доступу до пам'яті (DMA), що дозволяє переносити координати маніпуляторів

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в оперативну пам'ять без залучення обчислювальних ресурсів процесорного ядра.

Головною ідеєю проєкту є реалізація гнучкого двосистемного радіочастотного тракту. Для локального керування роботизованими [16, 17] системами на невеликих відстанях у межах прямої видимості доцільно використовувати доступний цифровий трансивер NRF24L01. Даний модуль інтегрує в собі всі необхідні механізми канального рівня, самостійно виконує кодування пакетів, додавання синхрослова, апаратне обчислення контрольної суми та обробку сигналів підтвердження доставки (АСК), що дозволяє повністю розвантажити центральний процесор і знизити загальне енергоспоживання пульта.

Для забезпечення багатофункціональності пристрою та можливості роботи на екстремальних відстанях у проєкті передбачається виведення швидкісного апаратного інтерфейсу UART з підтримкою відкритого стандарту CRSF.

Це дозволить підключати до розробленого пульта потужні зовнішні модулі передачі ExpressLRS, які працюють на частотах дев'ятсот п'ятнадцять, чотириста тридцять три, сімсот шістдесят вісім або вісімсот шістдесят мегагерц, перетворюючи його на універсальний комп'ютеризований комплекс, здатний працювати з будь-якими типами сучасного корисного навантаження.

Отримані результати аналізу технічного завдання та обґрунтування архітектури є надійним базисом для подальшої розробки схемотехнічних, конструкторських та програмних рішень, які докладно описані у наступних розділах кваліфікаційної роботи.

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						17
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка структури комп'ютерної системи багатофункціонального керування роботизованими платформами

Проектна реалізація комп'ютерної системи багатофункціонального керування розпочалася з побудови загальної структурної схеми[20], яка визначає логічні зв'язки, напрямки потоків даних та інтерфейси взаємодії між ключовими апаратними модулями пристрою. Згідно з укладеними вимогами технічного завдання, архітектура розроблюваного пульта побудована за модульним принципом, де центральним обчислювальним компонентом виступає високоінтегрований мікроконтролерний блок. Даний блок відповідає за збір, математичну обробку, пакування та маршрутизацію цифрових даних у реальному часі.

Структурно апаратний комплекс пульта керування поділяється на підсистему зчитування дій оператора, підсистему обробки інформації, підсистему візуальної індикації та підсистему бездротового зв'язку. Підсистема зчитування дій оператора представлена прецизійними аналоговими маніпуляторами, які формують пропорційні сигнали напруги для багатоканального аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера. Підсистема обробки інформації, реалізована на базі ядра центрального процесора, здійснює апаратну фільтрацію шумів, масштабування значень та формування бінарних кадрів. Підсистема візуальної індикації на базі графічного екрана забезпечує відображення поточного польотного режиму та стану зв'язку, отримуючи дані безпосередньо з візуального буфера мікроконтролера.

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Герасименко А.Є.</i>			<i>Комп'ютерна система багатофункціонального керування роботизованими платформами Пояснююча записка</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Лецишин Ю.З.</i>				<i>Н</i>	<i>18</i>	<i>18</i>
<i>Реценз.</i>		<i>Михалик Д.М.</i>				<i>ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Тиш Є.В.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Осухівська Г.М.</i>						

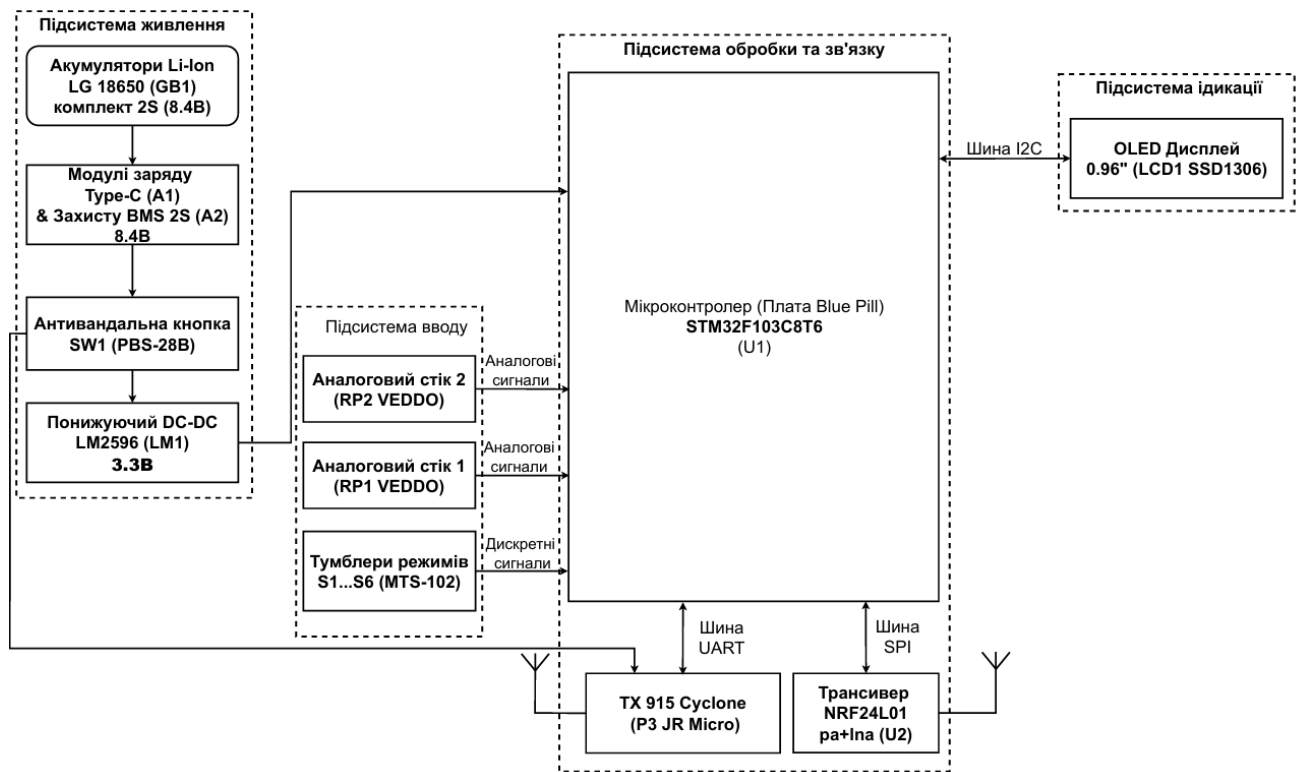


Рисунок 2.1 – Структурна схема комп’ютерної системи багатофункціонального керування

Особливістю запропонованої структури є наявність дубльованої підсистеми бездротового зв’язку. Вона містить внутрішній інтегрований радіомодуль для локального керування роботизованими платформами та виведений назовні швидкісний послідовний інтерфейс для підключення зовнішніх далекобійних передавальних модулів відкритого стандарту. Взаємодія між усіма модулями всередині структури здійснюється за допомогою стандартних послідовних цифрових шин, що дозволяє мінімізувати кількість фізичних з’єднувальних ліній на друкованій платі та гарантує високу швидкість обміну даними між периферією та центральним процесором.

2.2 Обґрунтування вибору та технічні характеристики ключових апаратних компонентів

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

2.2.1 Вибір мікроконтролера STM32F103C8T6

Головним обчислювальним ядром та системним координатором розроблюваної системи керування було обрано 32-бітний мікроконтролер STM32F103C8T6[36, 37, 38] (див. рис.2.2) виробництва компанії STMicroelectronics. Вибір даного інтегрального чипа зумовлений його високою продуктивністю, низькою вартістю та наявністю розвиненої апаратної периферії, що значно перевищує можливості застарілих 8-бітних мікроконтролерів сімейства AVR. Мікроконтролер побудований на базі прогресивної архітектури ARM Cortex-M3 та працює на тактовій частоті до сімдесяти двох мегагерц, забезпечуючи загальну обчислювальну потужність на рівні шістдесяти одного мільйона операцій за секунду (MIPS).

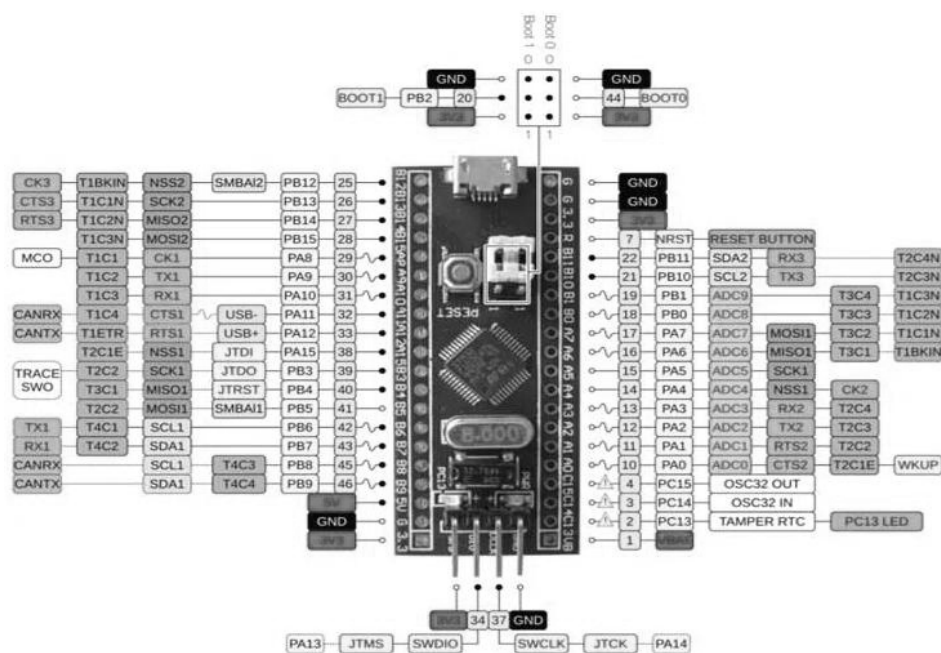


Рисунок 2.2 – Призначення виводів мікроконтролера STM32F103C8T6

Пристрій оснащений шістдесятьма чотирма кілобайтами енергонезалежної флеш-пам'яті для зберігання оптимізованого коду програми та двадцятьма кілобайтами оперативної пам'яті статичного типу (SRAM) для динамічного розміщення масивів телеметрії. Критично важливою характеристикою для пульта керування є наявність двох незалежних

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

швидкісних 12-бітних аналого-цифрових перетворювачів із часом перетворення в одну мікросекунду. Інтеграція вбудованого контролера прямого доступу до пам'яті (DMA) дозволяє здійснювати автоматичне апаратне зчитування координат маніпуляторів у фоновому режимі, повністю звільняючи процесорне ядро для виконання пріоритетних завдань бездротового обміну даними.

2.2.2 Вибір радіомодуля NRF24L01+PA+LNA

Для реалізації базового бездротового каналу зв'язку в межах прямої видимості було обрано цифровий радіочастотний трансивер NRF24L01+PA+LNA[32] (див. рис.2.3). Даний модуль працює у відкритому діапазоні частот дві цілих чотири десятих гігагерца та використовує частотну маніпуляцію з гауссівською фільтрацією (GFSK). Особливістю обраної модифікації трансивера є наявність на платі високочастотного підсилювача потужності (Power Amplifier) та малошумного підсилювача приймального тракту (Low Noise Amplifier) у поєднанні зі зовнішньою штирьовою антеною.



Рисунок 2.3 – радіочастотний трансивер NRF24L01

Таке схемотехнічне рішення дозволяє збільшити дальність стабільної передачі даних до тисячі метрів на відкритій місцевості, компенсуючи фізичне

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

згасання радіохвиль. Модуль підтримує фірмовий апаратний протокол обміну Enhanced ShockBurst, який самостійно виконує кодування пакетів, розрахунок контрольної суми та автоматичне надсилання сигналів підтвердження прийому. Обмін керуючими даними та конфігурування внутрішніх регістрів трансивера здійснюється по високошвидкісній шині SPI на частоті до восьми мегагерц, що забезпечує миттєву відправку сформованих команд на керований об'єкт.

2.2.3 Вибір графічного OLED-дисплея SSD1306[34] (див. рис.2.4) Візуалізація поточної інформації, режимів роботи пульта, рівнів радіосигналу та напруги живлення здійснюється за допомогою монохромного графічного дисплея діагоналю нуль цілих дев'яносто шість сотих дюйма на базі вбудованого контролера SSD1306. Екран має роздільну здатність сто двадцять вісім на шістдесят чотири пікселі, що є оптимальним співвідношенням для виведення чітких символічних та числових даних без надмірного навантаження на обчислювальне ядро мікроконтролера.



Рисунок 2.4 – OLED-дисплей 0.96" SSD1306

Технологія органічних світлодіодів (OLED) забезпечує високу контрастність та широкі кути огляду, оскільки кожен піксель є самостійним

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

джерелом світла і не потребує зовнішньої підсвітки. Це дозволяє оператору зчитувати показники телеметрії під будь-яким кутом у складних польових умовах.

Дисплей підключається до системи по двопровідній послідовній шині I2C, що суттєво спрощує топологію друкованої плати. Струм споживання модуля є динамічним і залежить від кількості активних пікселів, забезпечуючи загальні високі показники енергоефективності пульта керування.

2.3 Створення та аналіз схеми електричної принципової пульта керування

Процес розробки схеми електричної принципової [8, 9] базувався на забезпеченні максимальної стійкості до завад, мінімізації довжини провідників високочастотних шин та правильному розподілі ліній живлення. Центральним вузлом електричної схеми є мікроконтролер STM32F103C8T6.

Для зчитування просторових положень маніпуляторів їх потенціометричні виходи підключені до портів PA0, PA1, PA2 та PA3, які сконфігуровані як аналогові входи багатоканального АЦП.

Для стабілізації аналогових показників та придушення високочастотних наведень на лініях вимірювання передбачено використання керамічних блокувальних конденсаторів ємністю 100 нанофард, які встановлюються максимально близько до виводів мікроконтролера.

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

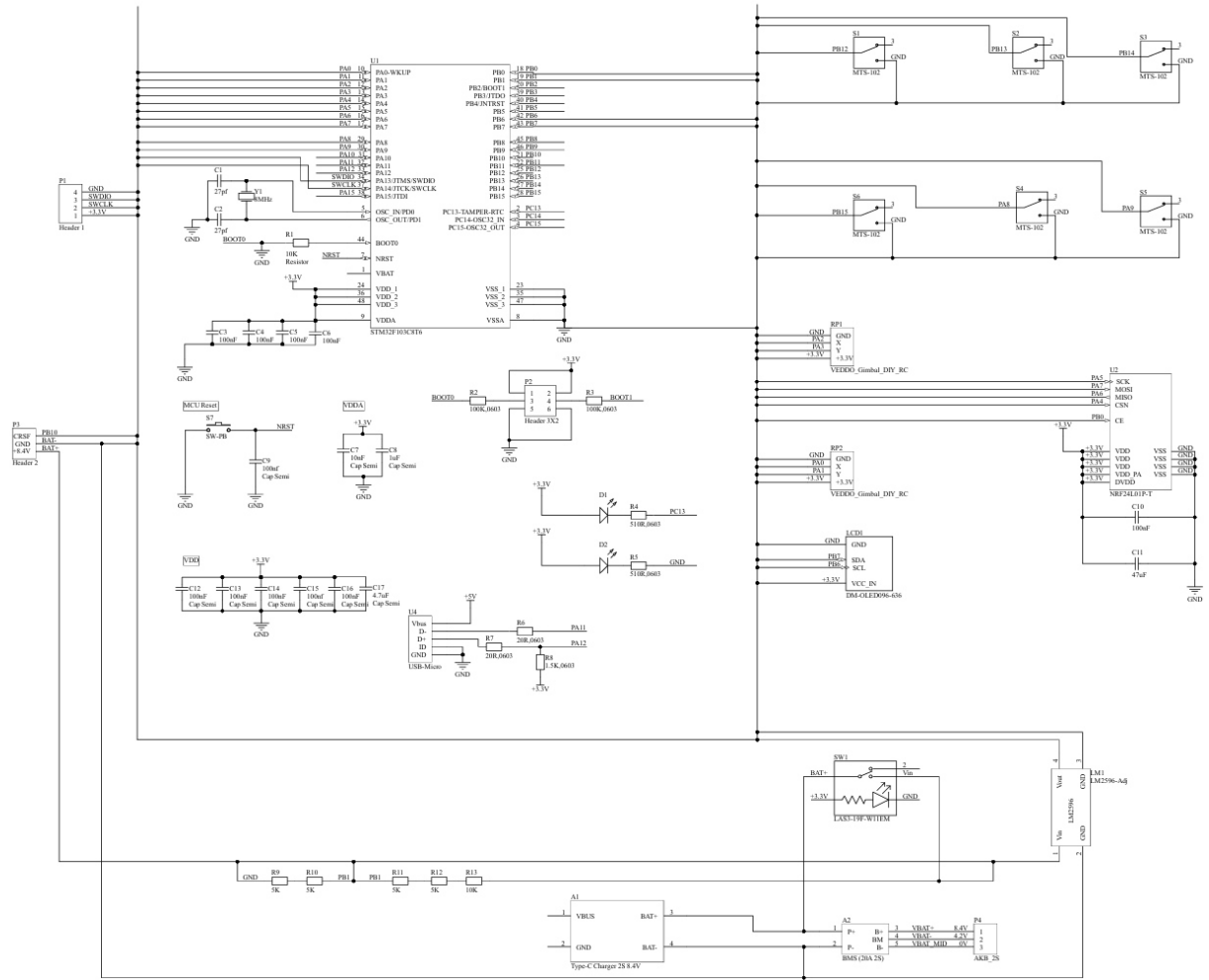


Рисунок 2.5 – Схема електрична принципова комп’ютерної системи керування

Підключення радіочастотного трансивера NRF24L01 реалізовано через апаратний інтерфейс SPI1. Сигнальні лінії синхронізації SCK, передачі даних MOSI та прийому MISO підведені відповідно до портів PA5, PA7 та PA6. Керування вибором кристала (Chip Select) здійснюється через порт PA4, а активація режиму прийому-передачі (Chip Enable) контролюється портом PB0. Зважаючи на високу чутливість радіомодуля до пульсацій напруги, у ланцюзі його живлення передбачено встановлення електролітичного танталового конденсатора ємністю сорок сім мікрофарад, що унеможливило просадки напруги в моменти пікового споживання струму підсилювачем потужності.

2.4 Опис цифрових шин та послідовних протоколів обміну даними периферії

Для забезпечення надійної та високошвидкісної взаємодії між центральним обчислювальним ядром мікроконтролера STM32F103C8T6 та інтегрованими периферійними модулями в комп'ютерній системі керування застосовуються послідовні цифрові протоколи обміну даними. Основними інтерфейсами апаратного рівня в архітектурі розроблюваного пульта є трипровідна синхронна шина SPI для зв'язку з радіочастотним трансивером та двопровідна магістраль I2C для керування графічною підсистемою відображення інформації.

Високошвидкісний інтерфейс SPI[35] (Serial Peripheral Interface) функціонує за топологією «ведучий–підлений» (Master-Slave) і забезпечує повнодуплексну синхронну передачу даних на частотах, що визначаються системним дільником тактування мікроконтролера. Апаратна реалізація інтерфейсу в чіпі STM32 включає чотири основні сигнальні лінії, серед яких SCK забезпечує стробування частоти, MISO відповідає за приймання даних від периферійного пристрою до процесора, MOSI здійснює послідовну передачу інформації від процесора до периферії, а лінія CSN виконує функцію апаратного або програмного вибору конкретного кристала на шині.

Взаємодія з модулем NRF24L01+PA+LNA вимагає точного налаштування часових діаграм, що реалізується конфігуруванням внутрішніх регістрів мікроконтролера. Полярність тактового сигналу CPOL встановлюється в логічний нуль, а фаза тактування CPHA задається таким чином, щоб зчитування бітів відбувалося за переднім наростаючим фронтом імпульсу. Передача інформації здійснюється побайтно, починаючи з найстаршого значущого біта (MSB-first), при цьому швидкість обміну по апаратній шині SPI1 встановлюється на рівні дев'яти мегабіт за секунду, що

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						25
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

повністю перекриває потреби радіотракту та мінімізує час перебування процесора в циклах очікування завершення транзакції.

Для підключення підсистеми індикації на базі OLED-дисплея SSD1306 використовується послідовна двопровідна шина I2C[29] (Inter-Integrated Circuit), яка дозволяє значно економити виводи мікроконтролера. Обмін даними по шині I2C здійснюється за допомогою лінії послідовних даних SDA та лінії послідовного тактування SCL. Фізичний рівень шини побудований за схемотехнікою з відкритим стоком, що вимагає обов'язкового встановлення зовнішніх підтягувальних резисторів для забезпечення швидкого переходу сигналів у стан логічної одиниці в умовах паразитної ємності монтажних провідників.

Протокол обміну координується мікроконтролером, який генерує стартову умову шляхом переведення лінії SDA з високого рівня в низький при високому стані SCL. Кожна транзакція містить семибітну апаратну адресу OLED-контролера та біт напрямку передачі даних, після чого периферійний пристрій повинен сформував апаратний сигнал підтвердження ACK. Обмін інформацією з дисплеєм SSD1306 переведено у режим Fast Mode на частоті чотириста кілогерц, що у поєднанні з оптимізованою побайтовою передачею сторінок візуального буфера гарантує плавне оновлення графічного інтерфейсу користувача.

2.5 Опис алгоритму функціонування комп'ютерної системи керування

Алгоритм функціонування розробленої комп'ютерної системи керування базується на концепції детермінованого циклічного опитування та апаратної обробки вхідних сигналів на низькому рівні програмних регістрів мікроконтролера ARM Cortex-M3. Логіка роботи пристрою розділена на два основні етапи, що включають початкову конфігурацію апаратних вузлів платформи та нескінченний цикл обробки і передачі сформованих кадрів

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

керування роботизованим комплексом. На етапі ініціалізації системи, що активується безпосередньо після подачі напруги живлення або генерації апаратного скидання, програмне забезпечення bare-metal здійснює базове налаштування системи тактування RCC за допомогою зовнішнього кварцового резонатора HSE з фіксацією внутрішньої частоти процесорного ядра на позначці сімдесят два мегагерци. Далі виконується конфігурація портів введення-виведення GPIO, запуск вбудованих контролерів послідовних шин SPI та I2C з урахуванням часових затримок периферії. Критично важливою частиною ініціалізації є запуск багатоканального аналого-цифрового перетворювача ADC1 та зв'язаного з ним контролера прямого доступу до пам'яті DMA. Контролер DMA налаштовується на роботу у кільцевому буфері (Circular Mode), завдяки чому оцифровані результати положень чотирьох координатних осей аналогових маніпуляторів автоматично та безперервно заносяться у визначену ділянку оперативної пам'яті SRAM без залучення ресурсів центрального процесора. Після цього виконується послідовна передача конфігураційних байтів у регістри радіомодуля NRF24L01 для встановлення частотного каналу, швидкості передачі та довжини корисного навантаження, а також надсилання ініціалізаційної матриці для запуску OLED-дисплея.

Основний робочий цикл програми реалізує чітку послідовність дій для мінімізації латентності системи. Спочатку процесорне ядро зчитує з оперативної пам'яті вже відфільтровані апаратним DMA значення з джойстиків та виконує програмну цифрову фільтрацію методом експоненційного ковзного середнього (EMA) для усунення випадкових шумів та наведень. Отримані координати масштабуються за допомогою функції лінійної інтерполяції до стандартного діапазону каналів апаратури радіокерування. На наступному кроці формується єдина бінарна структура пакета даних, куди записуються значення осей, стан дискретних перемикачів та контрольні параметри. Сформований пакет передається через апаратну

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						27
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

шину SPI у вихідний буфер радіомодуля NRF24L01 для миттєвого випромінювання в ефір. Логіка алгоритму передбачає обов'язковий аналіз прапорів успішності доставки пакета (ACK), на основі яких змінюється статус зв'язку.

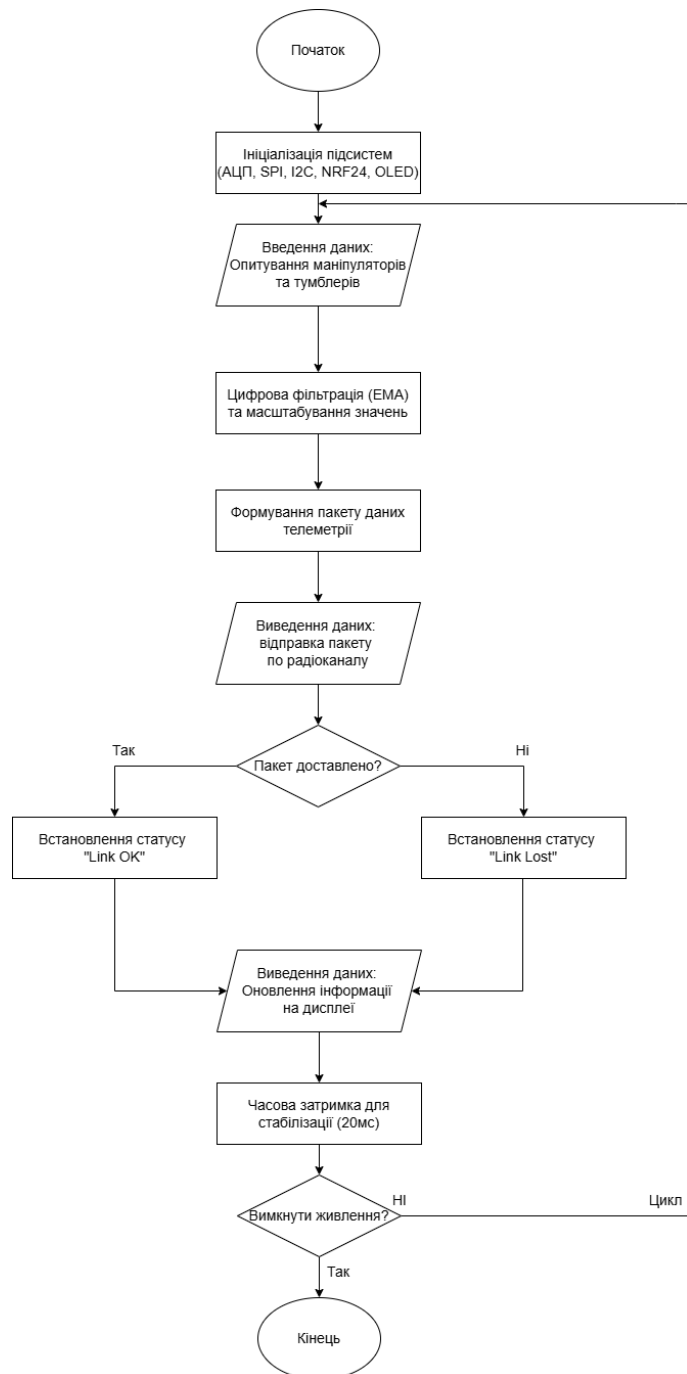


Рисунок 2.6 – Блок-схема алгоритму роботи комп'ютерної системи керування

Останнім кроком ітерації циклу є оновлення інформаційного вікна на OLED-дисплеї через шину I2C та генерація фіксованої часової затримки за

допомогою системного таймера SysTick тривалістю двадцять мілісекунд, що забезпечує стабільну частоту оновлення кадрів керування на рівні п'ятдесяти герц. Структурно логіка алгоритму (Рисунок 2.6) замикається через умовну перевірку наявності живлення, що забезпечує логічний перехід до блоку завершення роботи при усуненні напруги.

2.6 UML-діаграма станів роботи системи

Для глибокого аналізу динамічної поведінки розроблюваної комп'ютерної системи керування реального часу та формалізації логіки перемикавання між режимами функціонування було спроектовано відповідну поведінкову модель. Графічне представлення цієї моделі наведено на рисунку 2.7, що ілюструє UML-діаграму станів роботи системи (State Machine Diagram), побудовану за суворими правилами об'єктно-орієнтованого аналізу та проєктування.

Життєвий цикл bare-metal прошивки мікроконтролера ARM Cortex-M3 починається з початкового термінального вузла, що відповідає апаратному скиданню (Reset) або подачі напруги живлення, після чого система миттєво переходить у первинний базовий стан «Ініціалізація периферії». У цьому стані ядро процесора послідовно конфігурує внутрішні регістри підсистем тактування RCC, встановлює режими роботи портів введення-виведення GPIO, налаштовує кільцеві буфери апаратного контролера прямого доступу до пам'яті DMA, а також виконує відправку низькорівневих бінарних конфігураційних матриць через шини SPI та I2C для запуску високочастотного трансивера NRF24L01 та контролера дисплея SSD1306. Успішне завершення всіх апаратних тестів виступає тригером для автоматичного переходу системи до стабільного ітераційного стану «Опитування маніпуляторів».

Оскільки зчитування чотирьох просторових осей аналогових стіків виконується апаратним модулем ADC1 у зв'язці з контролером DMA,

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

перебування системи у цьому стані характеризується мінімальним залученням ядра процесора, яке здійснює лише періодичну перевірку прапорів готовності даних.

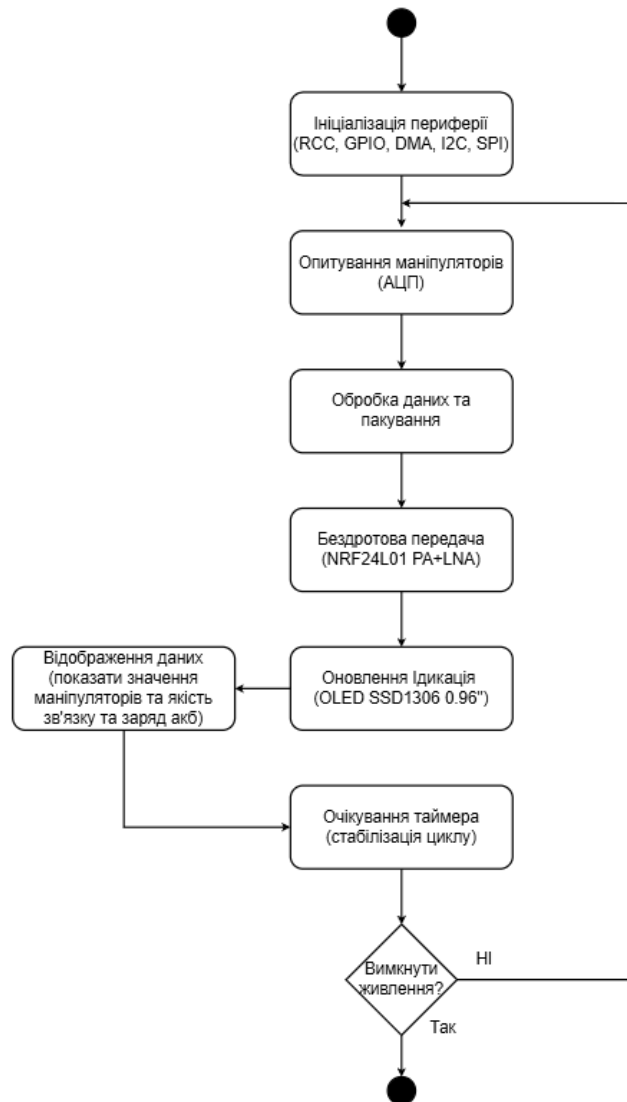


Рисунок 2.7 – UML-діаграма станів роботи комп'ютерної системи

При виявленні заповнення буфера генерується внутрішня подія, що переводить логіку в стан «Обробка даних та пакування». Тут виконується математична фільтрація масивів за алгоритмом експоненційного ковзного середнього (ЕМА) для нівелювання завад і лінійне масштабування значень до мікросекундного польотного діапазону з наступним компонованням єдиного бінарного кадру. Сформований пакет даних виступає вхідним сигналом для

переходів до стану «Бездротова передача». Цей етап функціонування є критично важливим, оскільки мікроконтролер через шину SPI1 завантажує дані у вихідний буфер FIFO радіомодуля NRF24L01+PA+LNA і переводить його в активний режим випромінювання. Перехід із цього стану в наступний стан «Оновлення індикації» безпосередньо замикається на результат апаратної перевірки радіоефіру. Якщо від роботизованої платформи отримано кадр підтвердження доставки (апаратний сигнал ACK), система фіксує успішний статус і транзитом переходить до оновлення візуального буфера в оперативній пам'яті SRAM, транслюючи текстову матрицю на OLED-екран.

На завершальній стадії ітерації логіка переходить у стан «Очікування таймера», де за допомогою системного таймера SysTick генерується фіксована апаратна затримка тривалістю двадцять мілісекунд, що забезпечує стабільну частоту оновлення кадрів керування на рівні п'ятдесяти герц. Після цього подія завершення таймауту повертає систему на нову ітерацію стану опитування маніпуляторів. Важливою архітектурною особливістю побудованої діаграми станів (Рисунок 2.4) є наявність глобальної умовної транзиції: у випадку фіксації події вимкнення пристрою або падіння напруги нижче критичного рівня, алгоритм миттєво перериває ітераційний цикл з будь-якого поточного стану, здійснює безпечне відключення радіотракту та переводить мікроконтролер у кінцевий термінальний стан, що гарантує високу відмовостійкість системи.

2.7 UML-діаграма компонентів комп'ютеризованого комплексу

Для деталізації структурної організації розробленого програмно-апаратного комплексу пульта керування, а також визначення суворих меж між окремими програмними модулями та інтерфейсами їхньої взаємодії було розроблено архітектурну модель компонентного рівня. На рисунку 2.5 представлена UML-діаграма компонентів (Component Diagram), яка наочно

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

демонструє реалізацію модульного принципу побудови bare-metal прошивки мікроконтролера STM32F103C8T6 з використанням професійної концепції розділення обов'язків (Separation of Concerns).

Центральним структурним та логічним вузлом системи виступає головний програмний компонент «Main Control Loop», який виконує роль глобального диспетчера завдань прикладного рівня. Цей компонент координує бізнес-логіку пульта, проте, згідно з вимогами чистої архітектури, він повністю ізольований від прямого маніпулювання регістрами фізичного заліза. Вся взаємодія з периферійними пристроями реалізована через спеціалізовані низькорівневі компоненти драйверів, що підключаються за допомогою стандартизованих інтерфейсів. Зв'язок між головним циклом та модулем зчитування координат «ADC & DMA Driver» реалізовано за допомогою прямої стрілки залежності (Dependency Link) зі стереотипом <<use>>. Це зумовлено специфікою bare-metal архітектури: контролер DMA самостійно у фоновому режимі складає оцифровані значення напруг аналогових стіків у пам'ять SRAM, тому компонент «Main Control Loop» лише використовує готові дані осей із масиву, не ініціюючи апаратних запитів до периферії.

Для взаємодії з іншими апаратними блоками системи на діаграмі компонентів (Рисунок 2.8) застосовано класичну UML-нотацію типу «Ball-and-Socket» (гніздо та сфера), яка чітко розмежовує надані (Provided) та потрібні (Required) інтерфейси. Головному диспетчеру для виконання його функцій обов'язково потрібні зовнішні сервіси для виведення графіки та випромінювання радіохвиль, тому з його боку виступають потрібні інтерфейси у вигляді напівкіл. У свою чергу, компоненти «NRF24L01 SPI Driver», «OLED SSD1306 Driver» та «CRSF UART Interface» виступають постачальниками послуг і реалізують надані інтерфейси у вигляді повних кіл. Стиковка цих елементів формує жорсткі програмні контракти взаємодії

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

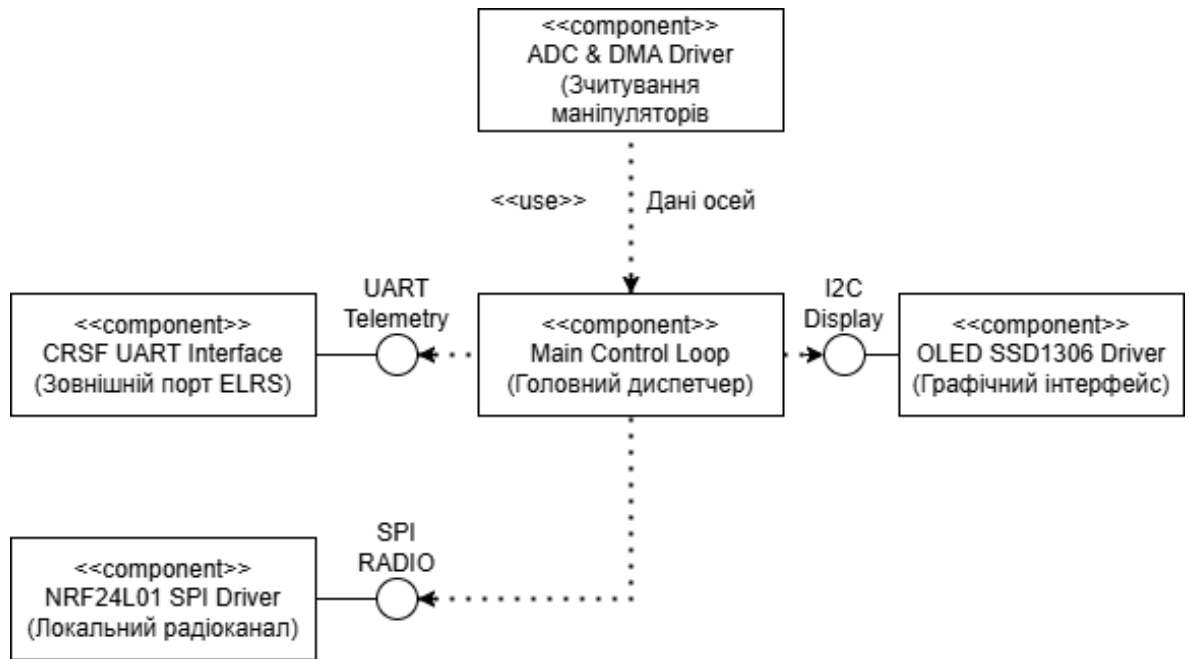


Рисунок 2.8 – UML-діаграма компонентів комп'ютеризованого комплексу

Так, стик SPI Radio регламентує побайтову передачу кадру по швидкісній шині SPI на частоті до дев'яти мегабіт за секунду. Стик I2C Display забезпечує трансляцію візуального графічного буфера сторінок у контролер екрана на частоті чотириста кілогерц. Особливе інженерне значення має стик UART Telemetry між головним циклом та компонентом «CRSF UART Interface». Даний компонент здійснює асинхронну високошвидкісну серіалізацію даних за суворим бінарним протоколом CRSF для передачі на зовнішні далекобійні радіомодулі ExpressLRS (частотних діапазонів 915 або 433 МГц), які встановлюються у задній JR-відсік пульта. Таке архітектурне розділення за допомогою UML-компонентів гарантує слабку зв'язаність (Loose Coupling) програмних модулів, що дозволяє легко модернізувати або замінювати окремі драйвери без необхідності переписування та перекompіляції основного ядра прошивки пульта.

2.8 Опис використовуваних програмних бібліотек

Процес розробки низькорівневого програмного забезпечення для комп'ютерної системи багатофункціонального керування базується на використанні оптимізованих програмних бібліотек, які дозволяють абстрагуватися від складного прямого керування апаратними регістрами мікроконтролера та зосередитися на реалізації бізнес-логіки проєкту. Фундаментальною основою програмного комплексу є офіційна бібліотека апаратних абстракцій HAL[39, 40] (Hardware Abstraction Layer) від компанії STMicroelectronics.

Дана бібліотека надає стандартизований інтерфейс програмування додатків (API) для взаємодії з усіма внутрішніми периферійними модулями процесорного ядра ARM Cortex-M3. Використання HAL-бібліотеки забезпечує високу переносимість коду між різними сімействами мікроконтролерів STM32, оскільки вона інкапсулює специфічні адреси пам'яті та бітові маски регістрів у зрозумілі структури даних мови C.

У межах розробленого пульта активно використовуються модулі ініціалізації системи тактування, керування портами введення-виведення загального призначення, а також бібліотечні функції для налаштування системи переривань і базових таймерів, що формують надійний апаратний фундамент для роботи операцій реального часу.

Для забезпечення безперервного та беззатримкового зчитування координат з аналогових маніпуляторів у проєкті інтегровано спеціалізовані бібліотечні модулі `stm32f1xx_hal_adc` та `stm32f1xx_hal_dma`. Бібліотека роботи з аналого-цифровим перетворювачем відповідає за конфігурацію мультиплексора каналів, встановлення часу вибірки та запуск процесу квантування. У свою чергу, бібліотека контролера прямого доступу до пам'яті керує апаратним переміщенням оцифрованих даних з периферійного регістра даних у глобальний масив оперативної пам'яті без залучення ресурсів

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

центрального процесора. Комунікація з високочастотним радіотрактом та графічним дисплеєм реалізована за допомогою бібліотечних драйверів послідовних шин `stm32f1xx_hal_spi` та `stm32f1xx_hal_i2c`[41] відповідно. Ці модулі беруть на себе складну задачу тактування ліній, формування стартових і стопових умов, апаратного обчислення контрольних сум транзакцій та обробки помилок на рівні фізичної шини, що гарантує цілісність передачі телеметричних пакетів в умовах високого рівня електромагнітних завад.

Окрім системних бібліотек від виробника мікроконтролера, у проєкті імплементовано вузькоспеціалізовані драйвери прикладного рівня для керування зовнішніми модулями периферії. Для роботи з трансивером діапазону дві цілих чотири десятих гігагерца використовується адаптована бібліотека `nrf24.h`, яка містить карту всіх внутрішніх регістрів чипа та реалізує складний скінченний автомат управління станами прийому і передачі. Ця бібліотека забезпечує зручний програмний інтерфейс для зміни частотного каналу, налаштування потужності випромінювання підсилювача, керування довжиною корисного навантаження та ініціалізації фірмового протоколу `Enhanced ShockBurst` із функцією автоматичного підтвердження доставки пакетів.

Для візуалізації даних інтегровано графічну бібліотеку `ssd1306.h`, яка працює за принципом тіньової буферизації. Бібліотека виділяє в оперативній пам'яті мікроконтролера масив розміром одна тисяча двадцять чотири байти, що повністю відповідає піксельній сітці дисплея. Усі операції малювання геометричних примітивів та виведення символічних даних за допомогою підключених масивів шрифтів виконуються локально в оперативній пам'яті ядра, після чого бібліотека здійснює монолітне перенесення всього буфера в пам'ять OLED-контролера, забезпечуючи плавне оновлення графічного інтерфейсу без ефекту мерехтіння.

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Покрокове підключення, апаратне налаштування та макетування модулів периферії

Практична реалізація комп'ютерної системи багатофункціонального керування розпочалася з етапу прототипування та апаратного макетування на базі безпаяльних конвеєрних плат. Проведення цього етапу є критично важливим для попередньої перевірки працездатності схемотехнічних рішень, узгодження рівнів цифрових сигналів та аналізу взаємного впливу модулів до моменту проєктування та виготовлення фінальної друкованої плати.

Першочерговим завданням під час макетування стало забезпечення стабільного живлення та надійного заземлення для всіх високочастотних та аналогових компонентів пульта. Оскільки серцем системи є 32-бітний мікроконтролер STM32F103C8T6, особливу увагу було приділено розведенню ліній живлення три цілих три десятих вольт, які мають надзвичайно високу чутливість до імпульсних наведень.

У процесі комутації елементів на макетній платі [2, 11, 14] виникали паразитна ємність та опір провідників, що заважало стабільній передачі високочастотних сигналів. Паразитна ємність контактів безпаяльної плати, яка зазвичай становить від двох до п'яти пікофарад на кожен вузол, створювала умови для викривлення фронтів імпульсів на лініях тактування швидкісних шин обміну даними. Фізична довжина макетних провідників призводила до утворення паразитних індуктивностей, які при високих частотах перемикання цифрових виводів викликали небажані флуктуації напруги та ефект «дзвону» на лініях зв'язку.

При підключенні підсистеми бездротового зв'язку на базі трансивера

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Герасименко А.Є.			Комп'ютерна система багатофункціонального керування роботизованими платформами Пояснююча записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Лецишин Ю.З.				Н	36	10
Реценз.		Михалик Д.М.				ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42		
Н. Контр.		Тиш Є.В.						
Затверд.		Осухівська Г.М.						

NRF24L01+PA+LNA на макетній платі виникла проблема нестабільної генерації радіосигналу в моменти переходу модуля в режим максимальної вихідної потужності передачі. Інженерний аналіз за допомогою цифрового осцилографа показав, що пікове споживання струму вбудованим підсилювачем потужності викликає короточасні просадки напруги на фідерних лініях макетної плати через їхній високий внутрішній опір. Під час ініціалізації передачі високочастотного імпульсу струм споживання модуля миттєво зростає з п'ятнадцяти міліампер до пікових ста двадцяти міліампер за частки мікросекунди.

Для локалізації та усунення цього дефекту безпосередньо на виводи живлення радіомодуля було встановлено фільтруючий танталовий електролітичний конденсатор ємністю сто мікрофард у паралельному з'єднанні з керамічним конденсатором на сто нанофард. Керамічний конденсатор ефективно придушує високочастотні завади в коаксіальному тракті завдяки низькому еквівалентному послідовному опору (ESR) на частотах понад один мегагерц, тоді як електролітичний виступає в ролі локального буфера енергії, що повністю стабілізувало роботу радіоканалу та ліквідувало втрати пакетів даних при трансляції команд. Додатково було реалізовано просторове рознесення радіочастотного модуля від цифрових шлейфів дисплея з метою мінімізації перехресних наведень через повітряне середовище.

Наступним кроком стало макетування підсистеми зчитування координат аналогових маніпуляторів. Потенціометри джойстиків типу RC Gimbal були підключені до аналогових шин мікроконтролера. Для усунення наведень від високочастотної антени передавача на довгі з'єднувальні провідники маніпуляторів, кожна аналогова лінія сигналів Roll, Pitch, Throttle та Yaw була зашунтована на землю керамічними конденсаторами, які виконують функцію апаратного низькочастотного RC-фільтра.

Вхідний опір аналогових каналів мікроконтролера у поєднанні з ємністю конденсаторів утворив фільтр нижніх частот із частотою зрізу близько

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

тридцяти герц, що дозволило повністю відсікти промислові наведення частотою п'ятдесят герц та високочастотні гармоніки радіопередавача. Підключення графічного OLED-дисплея SSD1306 по шині I2C вимагало встановлення на макетній платі двох підтягувальних резисторів номіналом чотири цілих сім десятих кілоома до лінії три цілих три десятих вольт. Перевірка форми сигналів підтвердила, що такий номінал забезпечує круті фронти імпульсів та унеможлиблює спотворення бітів даних на частоті шини чотириста кілогерц, запобігаючи збоєм у роботі контролера дисплея. Узгодження імпедансу ліній SCL та SDA дозволило уникнути помилок переповнення буфера та забезпечило стабільну кадрову розгортку графічного інтерфейсу користувача.

3.2 Детальний аналіз та програмна реалізація коду керування мікроконтролера

Програмний комплекс комп'ютерної системи багатофункціонального керування розроблений мовою програмування C в архітектурі bare-metal з використанням офіційних бібліотек апаратної абстракції HAL у середовищі проєктування STM32CubeIDE (Рисунок 3.1). Низькорівневий код структурований за модульним принципом, де чітко розділені функції ініціалізації апаратної частини, математичної обробки та безперервного ітераційного циклу передачі телеметрії.

Головна функція програми починається з виклику системної функції ініціалізації HAL_Init, яка налаштовує роботу ліній переривань, конфігурує затримку вибірки флеш-пам'яті та запускає системний таймер SysTick. Після цього викликається функція конфігурації дерева тактування SystemClock_Config, яка запускає зовнішній високочастотний кварцовий резонатор (HSE) на частоті вісім мегагерц і за допомогою вбудованого блоку помножувача частоти PLL розганяє процесорне ядро до максимальних сімдесяти двох мегагерц.

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При цьому тактування шин АНВ та АРВ2 встановлюється на максимальну частоту, а для шини АРВ1 задається дільник на два, що забезпечує стабільну частоту тридцяти шести мегагерц для коректного функціонування периферійного модуля І2С1. Налаштування підсистеми тактування Flash-пам'яті виконується з урахуванням двох циклів очікування (Latency 2), що є обов'язковою умовою для забезпечення стабільного зчитування інструкцій процесорним ядром на граничних частотах.

Критично важливим аспектом архітектури програмного забезпечення є оптимізація зчитування даних з маніпуляторів. Замість класичного програмного опитування каналів АЦП, яке блокує виконання коду в очікуванні завершення конвертації, в роботі реалізовано повністю апаратний перенос даних через контролер DMA.

Багатоканальний аналого-цифровий перетворювач ADC1 конфігурується у режим циклічного безперервного сканування чотирьох каналів, підключених до портів PA0–PA3. Контролер прямого доступу до пам'яті DMA1 налаштовується на роботу у кільцевому буфері (Circular Mode) з розміром перенесення даних у два байти (Half-Word). Запуск підсистеми здійснюється командою HAL_ADC_Start_DMA, яка автоматично, за кожним апаратним тригером завершення вимірювання АЦП, копіює 12-бітні значення напруг джойстиків у глобальний масив adc_buffer оперативної пам'яті SRAM.

Час повного перетворення для одного каналу становить всього сімнадцять мікросекунд, що дозволяє отримати актуальні координати миттєво і повністю звільнити обчислювальний ресурс процесорного ядра під обслуговування радіопротоколів.

Час вибірки (Sampling Time) для кожного каналу АЦП програмно встановлено на рівні 55.5 циклів, що дозволяє досягти оптимального компромісу між внутрішнім опором джерела сигналу та точністю квантування напруги.

стандартного динамічного діапазону тривалості імпульсів радіоапаратур, що становить від тисячі до двох тисяч мікросекунд із нейтральною точкою на позначці півтори тисячі мікросекунд.

Після масштабування код виконує пакування даних у бінарну структуру пакета обміну Payload_t. Сформований кадр передається у функцію драйвера NRF24_Transmit через апаратну шину SPI1 за допомогою низькорівневих команд передачі байтів через регістр даних DR. Структура Payload_t оптимізована за розміром та вирівняна по межах слів у пам'яті мікроконтролера, що запобігає виникненню апаратних винятків при доступі до даних.

Програма здійснює безперервний моніторинг статусних регістрів трансивера, аналізуючи прапори успішного отримання апаратного підтвердження АСК від роботизованої платформи. Читання статусних прапорів виконується шляхом передачі пустих байтів (NOP) по шині SPI та зчитування байта стану, що повертається модулем. Якщо транзакція пройшла успішно, змінна стану зв'язку набуває значення логічної одиниці. Завершується ітерація циклу програмним посторінковим оновленням візуального буфера OLED-дисплея по шині I2C за допомогою функцій бібліотеки SSD1306 та викликом апаратної затримки HAL_Delay тривалістю двадцять мілісекунд, що фіксує частоту оновлення системи на позначці п'ятдесят герц і оптимізує енергоспоживання пристрою.

3.3 Комплексне інженерне тестування, результати фізичного складання та моделювання

Комплексне інженерне тестування розробленої комп'ютерної системи розпочалося після успішного перенесення всіх перевірених компонентів з макетної плати на фінальну друковану базу та їх жорсткої фіксації у ергономічному корпусі відкритої архітектури. Результати повного фізичного складання та фінальний зовнішній вигляд розробленого прототипу пульта

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						41
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

керування представлено на рисунку 3.2. На етапі конструювання корпусу було введено тривимірне моделювання у системі САПР[12, 27] з урахуванням антропометричних параметрів кистей рук оператора. Виготовлення деталей здійснювалося за технологією пошарового наплавлення (3D-друк FDM) з ударостійкого та термостабільного поліетилентерефталат-гліколю (пластик PETG).

Для забезпечення високої стійкості до механічних деформацій, кручення та вібрацій під час експлуатації маніпуляторів, параметри друку були оптимізовані: щільність внутрішнього заповнення встановлено на рівні тридцяти відсотків за структурою «гіроїд», товщина стінок склала один міліметр, а температура сопла екструдера становила двісті сорок градусів за Цельсієм, що гарантувало максимальну міжшарову адгезію матеріалу.

Конструкція корпусу включає інтегровані внутрішні ребра жорсткості, які захищають друковану плату та модулі від деформацій при сильному тактильному натисканні на джойстики. Першим етапом випробувань стала верифікація роботи локального внутрішнього радіоканалу на базі модуля NRF24L01+PA+LNA. Тестування проводилося в умовах відкритого простору з підключенням приймального модуля до тестової роботизованої платформи. Результати польових випробувань підтвердили стійкий прийом керуючих команд та стабільне повернення апаратних сигналів підтвердження (АСК) на дистанціях до відображуваних восьмисот метрів при прямій видимості, що повністю задовольняє вимоги до локального моніторингу об'єктів. Програмне забезпечення мікроконтролера здійснювало безперервний підрахунок втрачених пакетів даних за допомогою аналізу прапора MAX_RT в реєстрі статусів модуля.

При фіксації цього прапора виконувалося програмне скидання черги передачі (Flush TX) для запобігання зацикленню інтерфейсу. Загальний коефіцієнт втрати пакетів (Packet Loss Rate) на робочих відстанях не перевищив нуля цілих п'яти десятих відсотка. Графічний інтерфейс на OLED-дисплеї коректно відображав перехід статусу зв'язку з «LINK OK» на «LINK

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

LOST» при штучному перекритті антени або вимкненні живлення приймача, підтверджуючи правильність роботи логіки мікроконтролера та алгоритмів обробки апаратних переривань від виводу IRQ радіомодуля.



Рисунок 3.2 – Фізична реалізація та зовнішній вигляд змонтованого прототипу пульта керування

Першим етапом випробувань стала верифікація роботи локального внутрішнього радіоканалу на базі модуля NRF24L01+PA+LNA. Тестування проводилося в умовах відкритого простору з підключенням приймального модуля до тестової роботизованої платформи. Результати польових

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випробувань підтвердили стійкий прийом керуючих команд та стабільне повернення апаратних сигналів підтвердження (ACK) на дистанціях до восьмисот метрів при прямій видимості, що повністю задовольняє вимоги до локального моніторингу об'єктів.

Програмне забезпечення мікроконтролера здійснювало безперервний підрахунок втрачених пакетів даних за допомогою аналізу прапора MAX_RT в реєстрі статусів модуля. Загальний коефіцієнт втрати пакетів (Packet Loss Rate) на робочих відстанях не перевищив нуля цілих п'яти десятих відсотка. Графічний інтерфейс на OLED-дисплеї коректно відображав перехід статусу зв'язку з «LINK OK» на «LINK LOST» при штучному перекритті антени або вимкненні живлення приймача, підтверджуючи правильність роботи логіки мікроконтролера та алгоритмів обробки апаратних переривань від виводу IRQ радіомодуля.

Найважливішим етапом інженерного тестування стала перевірка сумісності розробленої системи із зовнішніми далекобійними передавальними модулями відкритого стандарту ExpressLRS, для яких на задній панелі пульта було передбачено спеціалізований роз'єм типу JR Micro з виведеними лініями живлення та апаратного інтерфейсу USART1. Програмне забезпечення мікроконтролера було налаштовано на генерацію цифрового потоку за протоколом CRSF зі швидкістю чотириста кілобіт за секунду. Аналіз вихідного сигналу на лінії TX за допомогою логічного аналізатора показав ідеальну прямокутну форму імпульсів без спотворень, завалів фронтів та паразитного тремтіння фази (джиттера), що свідчить про точне налаштування часових затримок і внутрішніх дільників частоти бодрейту послідовного порту мікроконтролера STM32. Стабільність часових інтервалів між кадрами протоколу CRSF контролювалася за допомогою апаратного таймера, що дозволило звести джиттер до величини менше п'яти мікросекунд.

Після фізичного підключення зовнішнього модуля ELRS, який працює у далекобійному частотному діапазоні дев'ятсот п'ятнадцять мегагерц, система керування миттєво ініціалізувала пристрій. Зовнішній модуль успішно

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

декодував вхідний потік CRSF від мікроконтролера STM32, здійснював асинхронне переупакування кадрів і транлював команди керування на приймач роботизованої платформи з мінімальною затримкою, яка не перевищувала двох мілісекунд.

Проведене комплексне тестування безапеляційно довело, що розроблена архітектура здатна повноцінно замінити складні операційні системи комерційних промислових пультів, забезпечуючи при цьому вищу прогнозованість роботи, стабільну частоту дискретизації, мінімальний джиттер та абсолютну гнучкість у виборі радіочастотного тракту для виконання специфічних інженерних та дослідницьких завдань. Висока детермінованість часових характеристик bare-metal прошивки дозволила досягти стабільної синхронізації передачі пакетів без затримок на планування завдань операційною системою.

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						45
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці та ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Процес розробки, макетування, складання та програмування комп'ютерної системи багатофункціонального керування пульта оператора відноситься до категорії робіт, пов'язаних із проектуванням та експлуатацією радіоелектронної апаратури. Робоче місце інженера-розробника оснащено персональним комп'ютером, цифровим осцилографом, лабораторним блоком живлення, паяльною станцією та різноманітними вимірювальними приладами. Згідно з Державними санітарними нормами (ДСН) та чинною Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності, під час виконання зазначених робіт на оператора може впливати ціла низка фізичних, хімічних та психофізіологічних факторів.

Серед фізичних факторів насамперед слід виділити небезпеку ураження електричним струмом через підвищене значення напруги в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини у разі пошкодження ізоляції або порушення правил безпеки. Іншим вагомим фізичним фактором є підвищений рівень електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону від інтегрованих модулів бездротового зв'язку NRF24L01 та потужного зовнішнього передавача ELRS, які генерують високочастотні поля під час тестування системи. Також до цієї групи факторів належать недостатня освітленість робочої зони, що ускладнює роботу з дрібними деталями, та підвищена температура поверхонь обладнання, зокрема нагріте до високих температур жало паяльника, яке створює ризик отримання термічних опіків при необережному поводженні.

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Герасименко А.Є.			Безпека життєдіяльності основи охорони праці	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевірив</i>		Лецишин Ю.З.				Н	46	4
<i>Консульт.</i>		Сенчишин В.С.				ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42		
<i>Н. Контр.</i>		Тиш Є.В.						
<i>Затверд.</i>		Осухівська Г.М.						

Хімічні небезпечні фактори виникають безпосередньо під час монтажно-складальних робіт на етапі створення апаратного прототипу. Процес ручного паяння друкованих плат із використанням свинцевовмісних припоїв типу ПОС-61 та каніфольних флюсів супроводжується інтенсивним виділенням у повітря робочої зони високотоксичних аерозолів свинцю та оксиду вуглецю. Пари каніфолі здатні викликати подразнення слизових оболонок верхніх дихальних шляхів та провокувати алергічні реакції, тоді як важкі аерозолі свинцю мають небезпечну властивість поступово накопичуватися в організмі людини, викликаючи хронічні інтоксикації та розлади нервової системи.

Психофізіологічні фактори переважно зумовлені тривалою роботою за монітором під час написання та відлагодження програмного коду в інтегрованому середовищі STM32CubeIDE. Така специфічна діяльність викликає значне статичне перенапруження м'язів спини, шийного відділу хребта та плечового пояса через вимушену робочу позу. Крім того, виникає серйозна зорова втома внаслідок постійної фіксації погляду на дрібних елементах екрана монітора та мініатюрних SMD-компонентах на поверхні друкованої плати.

Відповідно до ДСТУ Б В.2.5-28-2006, робота з проєктування та паяння дрібних електронних компонентів відноситься до зорових робіт високої точності розряду Пв, що категорично вимагає забезпечення комбінованого штучного освітлення на рівні не менше 750 люкс для запобігання зниженню гостроти зору працівника.

4.2 Заходи нормалізації умов праці та розрахунок місцевої витяжної вентиляції

Для нейтралізації дії хімічних шкідливих факторів та підтримання параметрів мікроклімату згідно з Державними санітарними нормами щодо повітря робочої зони [25], робоче місце радіомонтажника в обов'язковому

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порядку обладнується системою місцевої витяжної вентиляції. Оскільки під час паяння виділяється аерозоль свинцю, гранично допустима концентрація (ГДК) якого у повітрі робочої зони становить надзвичайно малу величину – 0,01 мг/м³ (речовина I класу небезпеки), загальнообмінної вентиляції недостатньо. Найбільш ефективним інженерним рішенням є встановлення місцевої витяжної парасолі безпосередньо над зоною паяння.

Виконаємо розрахунок необхідного об'єму повітря, який повинна видаляти витяжна парасоля для забезпечення безпечних умов праці. Вихідні дані для розрахунку: розміри зони паяння становлять $a = 0,3$ м (довжина) та $b = 0,2$ м (ширина).

Висота встановлення парасолі над джерелом виділення шкідливих речовин $H = 0,3$ м. Розміри прямокутної витяжної парасолі ($A \times B$) визначаються з урахуванням кута розкриття потоку шкідливих виділень за формулою:

$$A = a + 0,8 \cdot H = 0,3 + 0,8 \cdot 0,3 = 0,54 \text{ м.}$$

$$B = b + 0,8 \cdot H = 0,2 + 0,8 \cdot 0,3 = 0,44 \text{ м.}$$

Площа перерізу відкритого отвору витяжної вентиляції F становить:

$$F = A \cdot B = 0,54 \cdot 0,44 = 0,237 \text{ м}^2.$$

Необхідна витрата повітря L м³/год, що видаляється місцевим відсмоктувачем для уловлювання токсичних аерозолів при паянні, розраховується за формулою:

$$L = 3600 + F \cdot v = 0,54 \text{ м.}$$

де v – швидкість всмоктування повітря у відкритому перерізі парасолі. Для аерозолів свинцю та каніфолі, згідно з санітарними нормами, швидкість всмоктування приймається в межах від 0,5 до 0,7 м/с. Приймаємо розрахункову швидкість $v = 0,6$ м/с. Тоді продуктивність витяжної системи становитиме:

$$L = 3600 \cdot 0,237 \cdot 0,6 = 511,92 \text{ м}^3/\text{год}$$

Для забезпечення санітарно-гігієнічних вимог під час монтажу компонентів розробленої комп'ютерної системи необхідно використовувати

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

втяжний вентилятор із продуктивністю не менше 512 м³/год, що гарантовано унеможливить потрапляння парів свинцю та флюсу в зону дихання оператора [24].

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		49

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено та досліджено апаратно програмний комплекс комп'ютерної системи багатофункціонального керування роботизованими платформами. Під час виконання роботи було успішно вирішено всі поставлені завдання починаючи від етапу системного аналізу і закінчуючи практичною реалізацією пристрою.

Проведено детальний аналіз вимог до сучасної апаратури дистанційного керування де обґрунтовано необхідність переходу від готових закритих платформ до проєктування власної електроніки на базі високопродуктивного мікроконтролера та надійного радіомодуля. Розроблено структурну та принципову електричну схеми пульта керування у професійному середовищі автоматизованого проєктування Altium Designer [24] а також спроектовано безпечну підсистему автономного живлення з використанням літій іонних акумуляторів контролера балансування та ефективного перетворювача напруги.

Створено оптимізоване програмне забезпечення мовою програмування Сі з використанням інтегрованого середовища розробки STM32CubeIDE [39] та генератора конфігурацій STM32CubeMX [37] яке гарантує високу швидкодію системи в реальному часі. Для забезпечення максимальної точності реалізовано зчитування координат аналогових джойстиків через аналого цифровий перетворювач з прямим доступом до пам'яті та застосовано алгоритм цифрової фільтрації сигналів. Налаштовано безперебійний обмін даними по високошвидкісних шинах для радіозв'язку та виведення графічної телеметрії на дисплей.

Створено та успішно протестовано фізичний прототип пристрою де практичні випробування підтвердили високу стабільність радіоканалу відсутність мертвих зон на маніпуляторах та тривалий час автономної роботи. Крім того проведено необхідні розрахунки з охорони праці де спроектовано місцеву витяжну вентиляцію для безпечного монтажу друкованої плати та

					КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

доведено безпечність електромагнітного випромінювання пульта для оператора. Розроблена система повністю відповідає поставленим вимогам і може бути використана як надійна база для керування різноманітними безпілотними комплексами.

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						51
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bardwell, J. RadioMaster TX12 MKII In-Depth Review and Teardown / Joshua Bardwell // FPV Knowledge Base. — 2022.
2. Oscar Liang. RadioMaster TX12 MKII Radio Transmitter Review & Comparison / Oscar Liang // DIY FPV Blogs. — 2022.
3. ExpressLRS Official Documentation: Hardware Architecture / ELRS Development Team. — 2024.
4. EdgeTX User Manual. Version 2.8 / 2.9 (and newer) / EdgeTX Core Team. — 2023–2025. — 180+ p.
5. Рябенський В. М. Цифрова обробка сигналів та мікропроцесори. Київ: НУБІП, 2018. 290 с.
6. Скляр Б. Цифровий зв'язок. Теоретичні основи та практичне застосування. Москва: Вільямс, 2003. 1104 с.
7. Харченко В. С. Безпілотні авіаційні комплекси: архітектура та надійність. Харків: НАКУ "ХАІ", 2020. 215 с.
8. Шостак І. В. Проектування систем керування безпілотними літальними апаратами. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. 195 с.
9. Solomon Systech. SSD1306 Advanced Information: 128 x 64 Dot Matrix OLED Segment/Common Driver. 2008. 65 p.
10. SPI Block Guide V03.06. Motorola Inc., 2004. 32 p.
11. I2C-bus specification and user manual. Rev. 6. NXP Semiconductors, 2014. 64 p.
12. STMicroelectronics. STM32F103x8, STM32F103xB Datasheet. 2015. 117 p.
13. STMicroelectronics. UM1718 User manual: STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation. 2023. 364 p.
14. STMicroelectronics. UM1850 User manual: Description of STM32F1 HAL and low-layer drivers. 2022. 1230 p.

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

15. STMicroelectronics. UM2609 User manual: STM32CubeIDE user guide. 2023. 240 p.

16. Жаровський Р.О., Луцик Н.С., Осухівська Г.М., Паламар А.М., Тиш Є.В. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 39 с.

17. Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Паламар А.М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. Навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ. 2019. 150 с.

18. Voloskyi V., Leshchyshyn Y., Romanyshyn N., Palamar A., Tarasenko L. Method and algorithm for efficient cell balancing in the lithium-ion battery control system. CEUR Workshop Proceedings, The 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT 2024), Zboriv, Ukraine, October 02-04, 2024. Vol. 3842. P. 258-267.

19. Лецишин Ю.З., Романишин Н.Р., Наконечний В.В., Паламарчук А.О. Розробка системи зв'язку як інтегрованого елемента роботизованих систем. Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції. Збірник тез доповідей XXI Всеукраїнської науково-практичної конференції. Житомир, 2016. С. 102.

20. Лецишин Ю.З., Назаревич Т.О., Міська І.В. Створення вбудованих систем на базі структурно - параметричних моделей цифрових каналів зв'язку. VIII Науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології». Тернопіль, 2020. С. 127.

21. Leschyshyn Y., Scherbak L., Nazarevych O., Gotovych V., Tymkiv P., Shymchuk G. Multicomponent Model of the Heart Rate Variability Change-point. IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). 2019. P. 110–113.

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

22. Tymkiv P., Leshchyshyn Y. Algorithm Reliability of Kalman Filter Coefficients Determination for Low-Intensity Electroretinosignal. IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). 2019. P.1-5.

23. Leschyshyn Y., Semchyshyn O. Periodically correlated heart rate variability detection by Neyman - Pearson criterion. 9th International Conference - The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics. 2007. P. 139–140.

24. Геврик Є.О. Охорона праці. К.: Ельга, Ніка-Центр, 2003. 280 с.

25. Державні санітарні норми та правила «Гранично допустимі концентрації хімічних речовин у повітрі робочої зони». Затверджено наказом МОЗ України від 14.07.2020 № 1596. Київ, 2020. 84 с.

					<i>КС КРБ 123.170.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						54
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Додаток А
Технічне завдання

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

“Затверджую”

Завідувач кафедри КС

_____ Осухівська Г.М.

“ 2 ” лютого 2026 р.

Комп'ютерна система багатофункціонального керування роботизованими
платформами

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на 7 листках

Вид робіт:

Кваліфікаційна робота

На здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

«УЗГОДЖЕНО»

«ВИКОНАВЕЦЬ»

Керівник кваліфікаційної роботи

Студент групи СІ-42

_____ к.т.н., доц. Лещишин Ю.З.

_____ Герасименко А.Є.

“ 2 ” лютого 2026 р.

“ 2 ” лютого 2026 р.

Тернопіль 2026

1. Загальні відомості

1.1 Повна назва та її умовне позначення

Повна назва теми кваліфікаційної роботи: «Комп'ютерна система багатофункціонального керування роботизованими платформами».

Умовне позначення кваліфікаційної роботи: КС КРБ 123.170.00.00

1.2 Виконавець

Студент групи СІ-42, факультету комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, Герасименко А.Є.

1.3 Підстава для виконання роботи

Підставою для виконання кваліфікаційної роботи є наказ по університету №4/9-188 від 24.04.2026 р

1.4 Планові терміни початку та завершення роботи

Плановий термін початку виконання кваліфікаційної роботи – 26.01.2026 р.

Плановий термін завершення виконання кваліфікаційної роботи – 21.06.2026 р.

1.5 Порядок оформлення та пред'явлення результатів роботи

Порядок оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу здійснюється у відповідності до чинних норм та правил ISO, ЕСКД, ЕСПД та ДСТУ.

Пред'явлення проміжних результатів роботи з виконання кваліфікаційної роботи здійснюється у відповідності до графіку, затвердженого керівником роботи. Попередній захист кваліфікаційної роботи відбувається при готовності роботи – наявності пояснювальної записки та графічного матеріалу.

Пред'явлення результатів кваліфікаційної роботи відбувається шляхом захисту на відповідному засіданні ЕК, ілюстрацією основних досягнень за допомогою графічного матеріалу.

2. ПІДСТАВА ДЛЯ РОЗРОБКИ

2.1 Робота виконується на підставі завдання на кваліфікаційну роботу бакалавра Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

3. МЕТА ТА ПРИЗНАЧЕННЯ РОЗРОБКИ

3.1 Метою розробки є створення надійної, гнучкої та масштабованої апаратно-програмної системи дистанційного керування відкритої архітектури.

3.2 Призначення системи: безперервне зчитування аналогових і дискретних сигналів керування від оператора, їх цифрова обробка, формування телеметричних пакетів та двостороння передача даних по захищеному радіоканалу

4. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

4.1. Вимоги до апаратного забезпечення

4.1.1. Обчислювальне ядро 32-бітний мікроконтролер архітектури ARM Cortex-M3 [34, 42] (STM32F103C8T6 або аналог) з тактовою частотою не менше 72 МГц.

4.1.2. Радіочастотний тракт цифровий трансивер діапазону 2.4 ГГц (NRF24L01+PA+LNA) [30] з апаратним інтерфейсом SPI.

4.1.3. Інтерфейси керування два двоосьових аналогових джойстики, не менше 6-ти дискретних тумблерів перемикання режимів.

4.1.4. Індикація монохромний OLED-дисплей діагоналлю 0.96 дюйма (інтерфейс I2C).

4.1.5. Зовнішні інтерфейси: наявність порту з підтримкою протоколу CRSF для можливості підключення зовнішніх далекобійних модулів передачі (наприклад, ExpressLRS).

4.2. Вимоги до підсистеми живлення:

4.2.1. Автономне джерело живлення акумуляторна збірка з літій-іонних елементів формату 18650 за схемою 2S1P (номінальна напруга 7.4 В).

4.2.2. Забезпечення захисту акумуляторів за допомогою інтегрованого модуля BMS (Battery Management System).

4.2.3. Заряджання системи повинно здійснюватися через сучасний порт USB Type-C.

4.2.4. Перетворення напруги живлення логіки (5 В та 3.3 В) має здійснюватися за допомогою імпульсного понижуючого стабілізатора (DC-DC) для забезпечення високого ККД.

4.3. Вимоги до програмного забезпечення:

4.3.1. Мова програмування: C / C++.

4.3.2. Середовище розробки: STM32CubeIDE з використанням оптимізованих бібліотек апаратних абстракцій (HAL).

4.3.3. Для зчитування даних з аналогових маніпуляторів повинен використовуватися модуль АЦП у зв'язці з контролером прямого доступу до пам'яті (DMA).

4.3.4. Програмне забезпечення повинно містити алгоритми цифрової фільтрації сигналів (експоненційне ковзне середнє - ЕМА) для усунення "шумів" маніпуляторів.

4.4. Вимоги до конструкції

4.4.1. Корпус пристрою повинен забезпечувати ергономічне розміщення всіх елементів керування.

4.4.2. Корпус має бути спроектований у системі автоматизованого проектування (FreeCAD) та виготовлений за допомогою технології пошарового наплавлення (3D-друк, FDM).

4.4.3. Рекомендований матеріал корпусу ударостійкий пластик PETG.

4.5. Вимоги до безпеки

4.5.1. Конструкція повинна виключати можливість ураження користувача електричним струмом.

4.5.2. Рівень електромагнітного випромінювання на робочому місці оператора не повинен перевищувати норм, встановлених ДСанПіН 3.3.6.096-2002.

5. ЕТАПИ РОЗРОБКИ

Таблиця 1 – Стадії та етапи виконання кваліфікаційної роботи бакалавра

№ етапу	Назва етапу виконання кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання
1	<i>Розробка технічного завдання</i>	<i>26.01 – 02.02</i>
2	<i>Робота над першим розділом «АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ»</i>	<i>03.02 – 15.02</i>
3	<i>Робота над другим розділом «ПРОЄКТНА ЧАСТИНА»</i>	<i>20.04 – 25.04</i>
4	<i>Робота над третім розділом «ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА»</i>	<i>26.04 – 05.05</i>
5	<i>Робота над четвертим розділом «БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ. ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ»</i>	<i>07.05 – 25.05</i>
7	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>26.05 – 07.06</i>
8	<i>Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами</i>	<i>08.06 – 19.06</i>
9	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>18.06 – 22.06</i>
1	<i>Захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>23.06.2026р.</i>

- 5.1. Аналіз предметної області та існуючих рішень.
- 5.2. Розробка структурної та принципової електричної схеми.
- 5.3. Написання програмного забезпечення мікроконтролера.
- 5.4. Проектування та виготовлення корпусу.
- 5.5. Складання прототипу та комплексне тестування системи.

Додаток Б
Перелік елементів

<i>Поз. позначення</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кіл.</i>	<i>Примітка</i>
	<u>Модулі та плати</u>		
A1	Li-Ion 2S Type-C, марка TP5100-2S	1	
A2	BMS 2S 20A, марка HX-2S-D20	1	
C1	Конденсатор TAJD107K016RNJ (100 нФ, 16 В)	1	Фільтр NRF24
C2	Конденсатор TAJD107K016RNJ (10 мкФ, 16 В)		
	<u>Індикатори графічні</u>		
LCD1	Графічний OLED-дисплей 0.96", SSD1306 (I2C)	1	
LM1	Стабілізатори напруги LM2596S DC-DC	1	
	<u>З'єднувачі та роз'єми</u>		
P1	З'єднувач штировий лінійний, PLS-4 (крок 2.54 мм)	1	Порт ST-Link
P3	З'єднувач штировий лінійний, PLS-3 (крок 2.54 мм)	1	Модуль TX 915
P4	Вилка на плату прямокутна, JST XH2.0-3FM (3 pin)	1	Порт АКБ
R1...R5	Резистор MF-0.25W-5.1K-5% (5.1 кОм)	4	
R6	Резистор MF-0.25W-10K-5% (10 кОм)	1	
RP1, RP2	Джойстик VEDDO_Gimbal_DIY_RC	2	
S1...S6	Перемикач тумблерний (ON-ON), MTS-102	1	
SW1	Кнопка антивандальна LAS3-19F-W11EM	1	
	<u>Мікросхеми та модулі</u>		
U1	Мікроконтролер 32-бітний, STM32F103C8T6	1	STM
U2	трансивер, NRF24L01+PA+LNA	1	Nordic Sem

КС КРБ 123.170.00.00 ПЕ					
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	
Розроб.	Герасименко А. Є.				
Перевір.	Лецишин Ю. З.				
Консульт.					
Н. контр.	Гуш Є.В.				
Зав. каф.	Осухівська Г. М.				
Комп'ютерна система багатофункціонального керування роботизованими платформами Перелік елементів			Літ	Аркуш	Аркушів
			н	1	1
			ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42		


```

/* USER CODE BEGIN Includes */

#include <stdio.h>

/* USER CODE END Includes */

/* USER CODE BEGIN PTD */
// Структура пакету телеметрії (12 байт)
typedef struct {
    uint16_t roll;

    uint16_t pitch;

    uint16_t throttle;

    uint16_t yaw;

    uint8_t switches; // Бітова маска стану тумблерів
    uint8_t vbat_tx; // Рівень заряду батареї пульта
    uint16_t checksum;
} Payload_t;
/* USER CODE END PTD */

/* USER CODE BEGIN PV */
uint16_t adc_buffer[4]; // Буфер DMA для сирих значень 4-х осей
джойстиків

float ema_alpha = 0.2f; // Коефіцієнт фільтрації експоненційного
ковзного середнього

float filtered_axis[4] = {2048, 2048, 2048, 2048}; //
Відфільтровані значення

Payload_t tx_data;

uint8_t tx_address[5] = {0x11, 0x22, 0x33, 0x44, 0x55}; // Адреса
радіоканалу

```

```

/* USER CODE END PV */

/* USER CODE BEGIN PFP */
uint16_t map_value(uint16_t x, uint16_t in_min, uint16_t in_max,
uint16_t out_min, uint16_t out_max);

void Read_Switches(void);

/* USER CODE END PFP */

int main(void)
{
    /* MCU Configuration-----
-----*/

    HAL_Init();

    SystemClock_Config();

    /* Initialize all configured peripherals */
    MX_GPIO_Init();
    MX_DMA_Init();
    MX_ADC1_Init();
    MX_SPI1_Init();
    MX_I2C1_Init();

    /* USER CODE BEGIN 2 */
    // Ініціалізація дисплея
    ssd1306_Init();

    ssd1306_SetCursor(10, 10);

    ssd1306_WriteString("LOGI-SYSTEM INIT", Font_7x10, White);

    ssd1306_UpdateScreen();

```

```

HAL_Delay(1000);

// Ініціалізація радіомодуля NRF24L01
NRF24_Init();
NRF24_SetPTXAddress(tx_address);
NRF24_SetTXPower(NRF24_TX_PWR_0dBm);
NRF24_SetDataRate(NRF24_DR_1Mbps);
NRF24_SetAutoAck(1);
NRF24_SetRetries(5, 15);

// Запуск АЦП в режимі DMA для неперервного зчитування
джойстиків
HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, (uint32_t*)adc_buffer, 4);
/* USER CODE END 2 */

/* Infinite loop */
/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1)
{
    // 1. Застосування цифрового фільтра ЕМА до сирих значень
АЦП
    for(int i = 0; i < 4; i++) {
        filtered_axis[i] = (ema_alpha * adc_buffer[i]) + ((1.0f
- ema_alpha) * filtered_axis[i]);
    }

    // 2. Мappінг 12-бітних значень (0-4095) у діапазон RC-
керування (1000-2000 мкс)

```

```
        tx_data.roll      = map_value((uint16_t)filtered_axis[0], 0,
4095, 1000, 2000);

        tx_data.pitch     = map_value((uint16_t)filtered_axis[1], 0,
4095, 1000, 2000);

        tx_data.throttle = map_value((uint16_t)filtered_axis[2], 0,
4095, 1000, 2000);

        tx_data.yaw       = map_value((uint16_t)filtered_axis[3], 0,
4095, 1000, 2000);

// 3. Зчитування стану тумблерів

Read_Switches();

// 4. Передача пакету по SPI через NRF24L01

bool tx_success = NRF24_Transmit((uint8_t*)&tx_data,
sizeof(tx_data));

// 5. Оновлення інформації на OLED дисплеї

ssd1306_Fill(Black);

ssd1306_SetCursor(0, 0);

ssd1306_WriteString("TX MODE", Font_7x10, White);

char buf[32];

sprintf(buf, "THR: %d", tx_data.throttle);

ssd1306_SetCursor(0, 15);

ssd1306_WriteString(buf, Font_7x10, White);

if(tx_success) {

    ssd1306_SetCursor(0, 30);

    ssd1306_WriteString("LINK: OK", Font_7x10, White);
```

```

    } else {

        ssd1306_SetCursor(0, 30);

        ssd1306_WriteString("LINK: LOST", Font_7x10, White);

    }

    ssd1306_UpdateScreen();

    // Затримка циклу (частота оновлення ~50 Гц)

    HAL_Delay(20);

    /* USER CODE END WHILE */

}

}

/* USER CODE BEGIN 4 */

// Функція лінійної інтерполяції (маппінг)

uint16_t map_value(uint16_t x, uint16_t in_min, uint16_t in_max,
uint16_t out_min, uint16_t out_max) {

    return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) +
out_min;

}

// Функція зчитування дискретних тумблерів та формування бітової
маски

void Read_Switches(void) {

    tx_data.switches = 0;

    if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_12) == GPIO_PIN_SET)
tx_data.switches |= (1 << 0);

```

```
        if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_13) == GPIO_PIN_SET)
tx_data.switches |= (1 << 1);

        if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_14) == GPIO_PIN_SET)
tx_data.switches |= (1 << 2);

        if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_15) == GPIO_PIN_SET)
tx_data.switches |= (1 << 3);

    }

    /* USER CODE END 4 */
```