

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

перший (бакалаврський)  
(рівень вищої освіти)

Розроблення пульта дистанційного керування роботом-промоутером

(тема)

Виконав:

здобувач 3 року навчання, (скорочений  
строк навчання)

групи АКТАКІТу 22-1

Микита СИЛЬЦОВ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

(повна назва освітньої програми)

Керівник професор Сергій НОВОСЕЛОВ

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАР

(підпис)

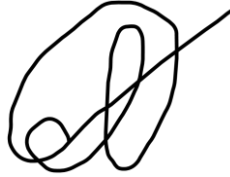
Ігор НЕВЛЮДОВ

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Сильцов Микита Костянтинович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів авторів мають посилання на відповідне джерело.

“9” липня 2025 р.



Сильцов Микита Костянтинович

## ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНИКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_

Освітня програма \_\_\_\_\_ Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_

(підпис)

« 19 » травня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Сильцову Микиті Костянтиновичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Розроблення пульта дистанційного керування роботом-промоутером \_\_\_\_\_

затверджена наказом університету від \_\_\_\_\_ 21.05.2025 р. № 405 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 19.07.2025 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Пульт дистанційного керування повинен забезпечувати бездротовий зв'язок на відстані до 100 м з використанням модуля nRF24L01; передавання команд здійснюється через джойстик (ось X та Y) та кнопки керування; для зворотного зв'язку використовується OLED-дисплей із графічним інтерфейсом; пульт має бути автономним, із живленням від акумулятора 18650 через модуль TP405; обчислювальна платформа – Arduino Uno (передавач) та Arduino Nano (приймач); програмне забезпечення реалізовано мовою C/C++ з використанням бібліотек RF24 та Adafruit SSD1306; дані передаються у вигляді структурованих пакетів з координатами стика та станом кнопок. \_\_\_\_\_

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

4.1 Вступ; \_\_\_\_\_

4.2 Обґрунтування вибору теми та аналіз існуючих рішень; \_\_\_\_\_

4.3 Проєктування системи пульта дистанційного керування; \_\_\_\_\_

4.4 Вибір апаратних компонентів та обґрунтування їх застосування; \_\_\_\_\_

4.5 Збирання та розробка програмного забезпечення передавального та приймального пристрою; \_\_\_\_\_

4.6 Тестування та налагодження системи керування; \_\_\_\_\_

4.7 Аналіз стійкості системи управління пристроєм;

4.8 Висновки.

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

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

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання роботи	Примітка
1	Обґрунтування вибору теми та аналіз існуючих рішень	06.06.25 – 15.06.25	викон.
2	Проектування системи пульта дистанційного керування	16.06.25 – 20.06.25	викон.
3	Вибір апаратних компонентів та обґрунтування їх застосування	24.06.25 – 28.06.25	викон.
4	Збирання та розробка програмного забезпечення передавального та приймального пристрою	29.06.25 – 01.07.25	викон.
5	Тестування та налагодження системи керування	02.07.25 – 04.07.25	викон.
6	Аналіз стійкості системи управління пристроєм	05.07.25 – 09.07.25	викон.
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism		
8	Оформлення пояснювальної записки		
9	Подання роботи на рецензію		
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри		
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 19.05.2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Микита СИЛЬЦОВ  
(власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

професор Сергій НОВОСЕЛОВ  
(посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 58 с., 10 табл., 22 рисунків, 2 додатки, 11 джерел.

ARDUINO, NRF24L01, ПУЛЬТ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ, OLED-ДИСПЛЕЙ, ДЖОЙСТИК, РАДІОЗВ'ЯЗОК, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМУВАННЯ.

Об'єкт розробки – процес дистанційного керування з використанням бездротового зв'язку.

Предмет розробки – структурна та функціональна організація пульта дистанційного керування як засобу забезпечення двосторонньої бездротової взаємодії між користувачем і виконавчим пристроєм.

Мета роботи – вдосконалення системи дистанційного керування шляхом розробки та дослідження функціонального пульта, який реалізує надійну двосторонню бездротову комунікацію на базі мікроконтролера Arduino та модуля nRF24L01, із використанням графічного OLED-інтерфейсу для зручності користувача.

Методи дослідження – вивчення технічної документації, практичне моделювання електронних схем, розробка програмного забезпечення мовою C/C++ для мікроконтролера Arduino.

У роботі розглянуто процес створення пульта дистанційного керування, описано принципи взаємодії між передавачем і приймачем за допомогою модуля nRF24L01, виведення інформації на OLED-дисплей, обробку сигналів з аналогового джойстика та використання бібліотек для Arduino.

Розроблений пристрій забезпечує стабільну бездротову передачу даних, графічне відображення інформації та керування рухомим об'єктом за допомогою джойстика. Для демонстрації роботи в лабораторних умовах реалізовано імітацію реакції виконавчих механізмів через світлодіоди.

## ABSTRACT

Explanatory note: 58 pp., 10 tables, 22 figures, 2 appendices, 11 sources.

ARDUINO, NRF24L01, REMOTE CONTROL, OLED DISPLAY, JOYSTICK, RADIO COMMUNICATION, MICROCONTROLLER, PROGRAMMING.

The object of developments – the process of remote control using wireless communication.

The subject of the developments – the structural and functional design of the remote control unit that ensures bidirectional wireless interaction between the user and the actuator.

The purpose of the work is to create a functional prototype of a remote control based on Arduino with the nRF24L01 module for data exchange, an OLED display for information output, and a joystick for control.

Research methods include studying technical documentation, practical modeling of electronic circuits, and developing software in C/C++ for the Arduino microcontroller.

The work covers the stages of creating the remote control device, describes the principles of interaction between transmitter and receiver via the nRF24L01 radio module, methods of displaying information on the OLED screen, processing analog joystick signals, and working with microcontroller libraries.

The resulting device provides stable data transmission over distance, displays current status on the screen, and controls a mobile object (robot) via the joystick. For demonstration purposes, LED indicators are used to simulate actuator responses in laboratory conditions.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Обґрунтування вибору теми та аналіз існуючих рішень .....	12
1.1 Аналіз завдання .....	12
1.2 Аналіз предметної області.....	13
1.3 Аналіз аналогічних рішень.....	14
1.4 Висновки .....	17
2 Проектування системи пульта дистанційного керування.....	18
2.1 Ідея та логіка побудови пристрою .....	18
2.2 Логіка роботи системи.....	20
2.3 Компонентна структура системи.....	20
2.4 Обмін даними між компонентами системи .....	21
2.5 Порівняльна характеристика технологій бездротового зв'язку .....	23
3 Вибір апаратних компонентів та обґрунтування їх застосування .....	26
4 Збирання та розробка програмного забезпечення передавального та приймального пристрою.....	32
4.1 Загальна архітектура та логіка передавача .....	32
4.2 Система введення: зчитування стику та кнопок .....	32
4.3 Інтерфейс OLED-дисплея та структура меню.....	34
4.4 Структура програмного забезпечення передавального пристрою.....	38
4.5 Принцип організації обміну даними .....	39
4.6 Загальна структура приймального пристрою.....	40
4.7 Приймання та обробка координат на приймальному пристрої.....	43
4.8 Обробка команд і керування виконавими елементами .....	44
4.9 Висновки .....	46
5 Тестування та налагодження системи керування .....	48
5.1 Методики тестування.....	48

	8
5.2 Результати роботи передавача .....	49
5.3 Результати роботи приймача.....	51
5.4 Дальність зв'язку та стабільність .....	52
5.5 Вимірювання енергоспоживання.....	54
5.6 Проблеми що виникали та способи їх усунення.....	56
5.7 Висновки за результатами тестування .....	56
6 Аналіз стійкості системи управління пристроєм.....	58
6.1 Математична модель П-регулятора.....	58
6.2 Передавальна функція в області z-перетворення.....	58
6.3 Умови стійкості системи .....	59
6.4 Візуалізація діапазону стабільності.....	60
Висновки .....	61
Перелік джерел посилань .....	62
Додаток А.....	64
Додаток Б .....	72
Додаток В.....	75

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
- ПЗ – пояснювальна записка;
- ADC – Analog-to-Digital Converter (аналогово-цифровий перетворювач);
- DC – Direct Current (постійний струм);
- I2C – Inter-Integrated Circuit (послідовний протокол передачі)
- IDE – Integrated Development Environment (інтегроване середовище розробки);
- MCU – Microcontroller Unit (мікроконтролер);
- OLED – Organic Light Emitting Diode (органічний світлодіод);
- PWM – Pulse Width Modulation (широтно-імпульсна модуляція);
- RAM – Random Access Memory (оперативна пам'ять);
- RF – Radio Frequency (радіочастота);
- SPI – Serial Peripheral Interface (послідовний периферійний інтерфейс);
- USB – Universal Serial Bus;
- Wi-Fi – Wireless Fidelity (бездротова локальна мережа).

## ВСТУП

Сучасні тенденції в галузі автоматизації, робототехніки та комп'ютерно-інтегрованих технологій вимагають створення ефективних засобів управління рухомими об'єктами, зокрема мобільними роботами. Актуальним є використання бездротових пультів дистанційного керування, які забезпечують гнучкість, зручність та безпеку експлуатації автоматизованих систем.

Актуальність теми визначається зростаючим попитом на портативні інтелектуальні системи керування, які можна швидко адаптувати до різних задач – від демонстраційного керування роботами-промоутерами до застосування у навчальних лабораторіях. Успішне використання таких пристроїв залежить від ефективної бездротової передачі команд, інтуїтивного інтерфейсу та стабільної роботи в реальному часі.

Мета роботи полягає у розробці функціонального прототипу пульта дистанційного керування для роботизованої платформи, що забезпечує двосторонній бездротовий зв'язок на основі модуля nRF24L01, графічний інтерфейс на OLED-дисплеї та керування за допомогою аналогового джойстика.

Для досягнення поставленої мети в рамках роботи необхідно розв'язати наступні задачі:

- здійснити аналіз існуючих рішень у сфері бездротового дистанційного керування;
- спроектувати архітектуру пульта з урахуванням вимог автономності, надійності та гнучкості;
- обґрунтувати вибір апаратних компонентів;
- реалізувати програмне забезпечення передавача та приймача;
- провести тестування системи, оцінити стабільність зв'язку, точність керування та енергоспоживання.

Об'єкт дослідження – система бездротового дистанційного керування на базі мікроконтролера Arduino.

Предмет дослідження – апаратно-програмна реалізація пульта дистанційного керування з графічним інтерфейсом та модулем радіозв'язку.

Методи дослідження, що застосовувалися в роботі, включають аналіз технічної документації, моделювання електронних схем, програмування мікроконтролера мовою C/C++, а також експериментальне тестування розробленої системи.

Практичне значення результатів полягає в створенні універсального програмованого пульта дистанційного керування, який може бути використаний для взаємодії з різними типами виконавчих пристроїв. Розробка має потенціал для масштабування та подальшої модифікації під потреби конкретних користувачів або проєктів у сфері автоматизації, освіти чи промислових технологій.

### 1.1 Аналіз завдання

У сучасному світі зростає попит на автоматизовані та дистанційно керовані системи, які дозволяють зручно і безпечно керувати різноманітними пристроями. Зокрема, актуальною є задача створення компактного пульта дистанційного керування, який міг би використовуватись для мобільних роботизованих платформ, демонстраційних стендів, промоутерів або навчальних проєктів. Такий пристрій має забезпечити стабільний радіозв'язок, зручний інтерфейс та можливість роботи в автономному режимі.

Потреба в подібних рішеннях виникає у випадках, коли необхідно дистанційно впливати на поведінку виконавчого механізму, не маючи прямого фізичного доступу до нього. Наприклад, у сфері реклами та виставкових демонстрацій часто використовуються мобільні роботи-промоутери, яким потрібно оперативно задавати напрямок руху або змінювати режим роботи. Використання пульта дає змогу оператору швидко реагувати на зміну обстановки або завдань, підвищуючи ефективність застосування технічного засобу.

Таблиця 1.1 – Основні вимоги до розроблюваного пристрою

Номер вимоги	Вимога	Обґрунтування
1	Бездротовий зв'язок до 100м	Для роботи на відкритій місцевості
2	Двосторонній зв'язок	Підтвердження прийому команд
3	OLED-дисплей	Відображення стану, меню

Продовження таблиці 1.1

Номер вимоги	Вимога	Обґрунтування
4	Автономне живлення	Портативність, зручність
5	Програмована архітектура	Гнучкість у застосуванні

У рамках кваліфікаційної роботи було поставлено завдання створити надійний, компактний, зручний у використанні пульт дистанційного керування, здатний працювати в умовах обмеженої видимості та потенційних радіоперешкод. Основні вимоги до системи включали:

- бездротовий зв'язок із дальністю до 100 метрів;
- підтримку двонаправленого обміну даними;
- наявність інтуїтивного інтерфейсу на основі OLED-дисплея;
- використання енергоефективних компонентів для забезпечення автономності;
- можливість гнучкої адаптації системи під різні типи виконавчих механізмів.

Таким чином, метою стало не просто створення нового пристрою, а розробка удосконаленої системи дистанційного керування, що об'єднує в собі переваги сучасних технологій з практичними потребами кінцевого користувача.

## 1.2 Аналіз предметної області

Система дистанційного керування, розроблена в межах цього дипломного проєкту, належить до категорії вбудованих систем реального часу, що використовуються для керування електромеханічними пристроями або роботизованими платформами. Такі системи мають широке застосування в різних галузях – від освіти і хобі до промислової автоматизації та реклами.

Однією з актуальних сфер використання подібних систем є керування мобільними роботами-промоутерами. Вони призначені для взаємодії з

аудиторією у публічних просторах, демонстрації інформації або залучення уваги до бренду. Для досягнення максимального ефекту від їх роботи потрібен інтуїтивний засіб керування, що забезпечує швидку зміну поведінки або маршруту руху пристрою. Саме таку функцію виконує пульт, що проектується.

Особливістю таких систем є необхідність стабільного бездротового зв'язку між пультом та виконавчим елементом, адже у багатьох випадках між ними може бути відстань у десятки метрів або фізичні перешкоди. Тому вибір модуля зв'язку, а також архітектури програмного забезпечення, має критичне значення.

Окрім мобільних роботів, аналогічні пульти застосовуються у навчальних лабораторіях для керування стендами, в аматорській робототехніці, у проєктах типу DIY (зроби сам), а також у різноманітних системах розумного дому. Тобто, функціональність і універсальність пульта, що розробляється, дозволяє його використання далеко за межами одного конкретного застосування.

Таким чином, предметна область розробки охоплює одразу кілька напрямів, а сам пристрій має потенціал для масштабування, модифікацій і застосування в ширшому колі задач. Це підвищує доцільність і практичну цінність реалізованого рішення.

### 1.3 Аналіз аналогічних рішень

Для обґрунтування доцільності розробки власного пульта дистанційного керування доцільно проаналізувати існуючі рішення, що представлені на ринку або у відкритих технічних джерелах. Серед таких пристроїв можна виділити як промислові контролери, так і аматорські конструкції на базі Arduino, Raspberry Pi або мікроконтролерів серії STM32.

Промислові пульти дистанційного керування, наприклад, ті що використовуються для керування кранами або технікою на виробництві, вирізняються високою надійністю, захистом від вологи та пилу, великим радіусом дії, але мають високу вартість і складність модифікації. Вони не завжди підходять для невеликих автономних роботизованих систем через габарити, ціну та обмежену можливість адаптації під нестандартні завдання.

Серед аматорських рішень часто використовуються прості пульти на базі передавачів RF 433 МГц або Bluetooth-модулів. Їх перевагою є простота реалізації та низька вартість, проте вони мають низьку швидкість передачі даних, невисоку надійність при наявності перешкод, а також відсутність можливості підтвердження прийому повідомлень. Крім того, більшість таких пультів не мають повноцінного користувачького інтерфейсу, що обмежує зручність використання.

Інші рішення на основі модулів Wi-Fi забезпечують вищу швидкість та гнучкість налаштування, але мають суттєво більше енергоспоживання, що робить їх непридатними для тривалого автономного використання.

На цьому тлі запропоноване рішення вирізняється поєднанням переваг: використання енергоефективного модуля nRF24L01 забезпечує стійкий двосторонній зв'язок; OLED-дисплей створює зручний інтерфейс; модульна структура програмного забезпечення дозволяє масштабувати функціональність; використання Arduino Uno спрощує відлагодження і адаптацію проєкту. Це робить розроблений пульт привабливим варіантом для широкого кола завдань, з можливістю подальшого розвитку.

Таблиця 1.2 – Порівняння аналогічних рішень

Назва рішення	Тип зв'язку	Дисплей	Живлення	Переваги	Недоліки
Пульт для іграшкових авто WLtoys A949	RF 27 MHz	Немає	Батарейки	Простота, дешевизна	Обмежений функціонал
Смартфон з додатком Arduino Bluetooth RC	Bluetooth	Екран телефону	Акумулятор	Потужна платформа	Залежність від телефону

Продовження таблиці 1.2

Назва рішення	Тип зв'язку	Дисплей	Живлення	Переваги	Недоліки
BroadLink RM4 Pro	Wi-Fi	Немає	Від розетки	Компактність, простота інтеграції з Home Assistant	Не програмується, залежний від хмарного сервісу
Пульт Flysky FS-GT2	RF 2.4 GHz	Немає	AA батарейки	Надійність, простота, широке застосування	Відсутність інтерфейсу, односторонній зв'язок
Розробка в дипломі	nRF24L01	OLED	18650 та TP4056	Автономність, двосторонній зв'язок, адаптивність	Потрібна попередня калібровка

Проведений огляд показує, що на сучасному ринку існує велика кількість рішень для дистанційного керування, які суттєво відрізняються за функціональністю, зручністю, ціною та призначенням. Одні з них забезпечують лише базові можливості, але приваблюють простотою та низькою вартістю, тоді як інші – технічно складні, професійні, часто з надлишковим функціоналом і високою ціною. Разом із тим, у багатьох з них відсутній повноцінний інтерфейс або зворотний зв'язок, що знижує зручність користування. Така ситуація свідчить про наявність ніші для пристроїв, які могли б поєднати базову зручність і гнучкість із розширеними можливостями керування та візуалізації – особливо у сфері навчання, хобі або демонстраційного використання.

Окрім базових функціональних можливостей, у сучасних системах дистанційного керування все більше значення надається інтерфейсу користувача. Йдеться не лише про виведення інформації на дисплей, а й про інтуїтивність навігації, наявність елементів візуального зворотного зв'язку та

зручність взаємодії загалом. У багатьох недорогих рішеннях ці аспекти залишаються недостатньо реалізованими, що ускладнює застосування пристрою в динамічних або нестандартних умовах.

Крім того, спостерігається зростаючий попит на відкриті й адаптивні рішення, які можна змінювати відповідно до конкретних потреб. У той час як більшість готових пультів мають фіксовану архітектуру, сучасна практика проєктування дедалі частіше орієнтується на універсальність і можливість самостійного налаштування – як апаратного, так і програмного. Це відкриває перспективи для створення пристроїв, які не лише виконують типові задачі, а й здатні масштабуватись та змінювати функціональність залежно від сценарію використання.

#### 1.4 Висновки

У межах розділу було розглянуто передумови для створення сучасної системи дистанційного керування, визначено ключові сфери її застосування, а також здійснено аналіз технічних рішень, що вже існують на ринку або в аматорських проєктах. Окрему увагу приділено порівнянню різних підходів до реалізації подібних систем, включаючи особливості організації зв'язку, наявність інтерфейсу, рівень автономності та складність налаштування.

Результати аналізу свідчать про те, що універсального варіанту, який би повністю задовольняв сучасні вимоги до портативного дистанційного керування, наразі не існує. Кожне з розглянутих рішень має як сильні сторони, так і певні обмеження у використанні. Це створює підґрунтя для подальшого пошуку гнучкої, адаптивної й зручної у використанні системи, яка б поєднувала в собі переваги існуючих рішень і відповідала сучасним умовам експлуатації. Сформований огляд закладає основу для наступного етапу – технічного проєктування системи з урахуванням виявлених вимог та обмежень.

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ПУЛЬТА ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ

У процесі створення будь-якої електронної системи важливо не лише підібрати апаратні компоненти, а й ґрунтовно продумати логіку її роботи, принципи взаємодії між елементами та загальну архітектуру. Це особливо актуально у випадках, коли йдеться про пристрої дистанційного керування, які повинні бути простими у користуванні, надійними та адаптивними до різних умов експлуатації. Саме тому на етапі проєктування ключову увагу приділено розробці концепції, яка б дозволила реалізувати гнучку та зрозумілу структуру пристрою з можливістю масштабування під конкретні задачі.

### 2.1 Ідея та логіка побудови пристрою

Основною ідеєю є створення пристрою, що забезпечуватиме інтуїтивно зрозумілу взаємодію між користувачем і віддаленим виконавчим елементом. Така система повинна не лише передавати команди, а й надавати зворотний зв'язок у вигляді повідомлень, індикації або оновлення стану на екрані. Підхід базується на циклічному аналізі дій користувача (наприклад, положення стика чи натискання кнопок), обробці отриманих даних, формуванні відповідного сигналу, його передаванні та, у разі необхідності, прийманні відповіді.

Загальна логіка роботи пристрою наведена у вигляді блок-схеми на рисунку 2.1. Схема демонструє покрокову структуру функціонування системи: початкова ініціалізація компонентів, зчитування стану елементів введення, формування пакету даних, передача сигналу та обробка відповіді. Окремим блоком передбачено оновлення інтерфейсу в залежності від отриманої інформації. Така архітектура дозволяє розбити систему на незалежні логічні модулі, які легко адаптуються під нові функції або сценарії використання.

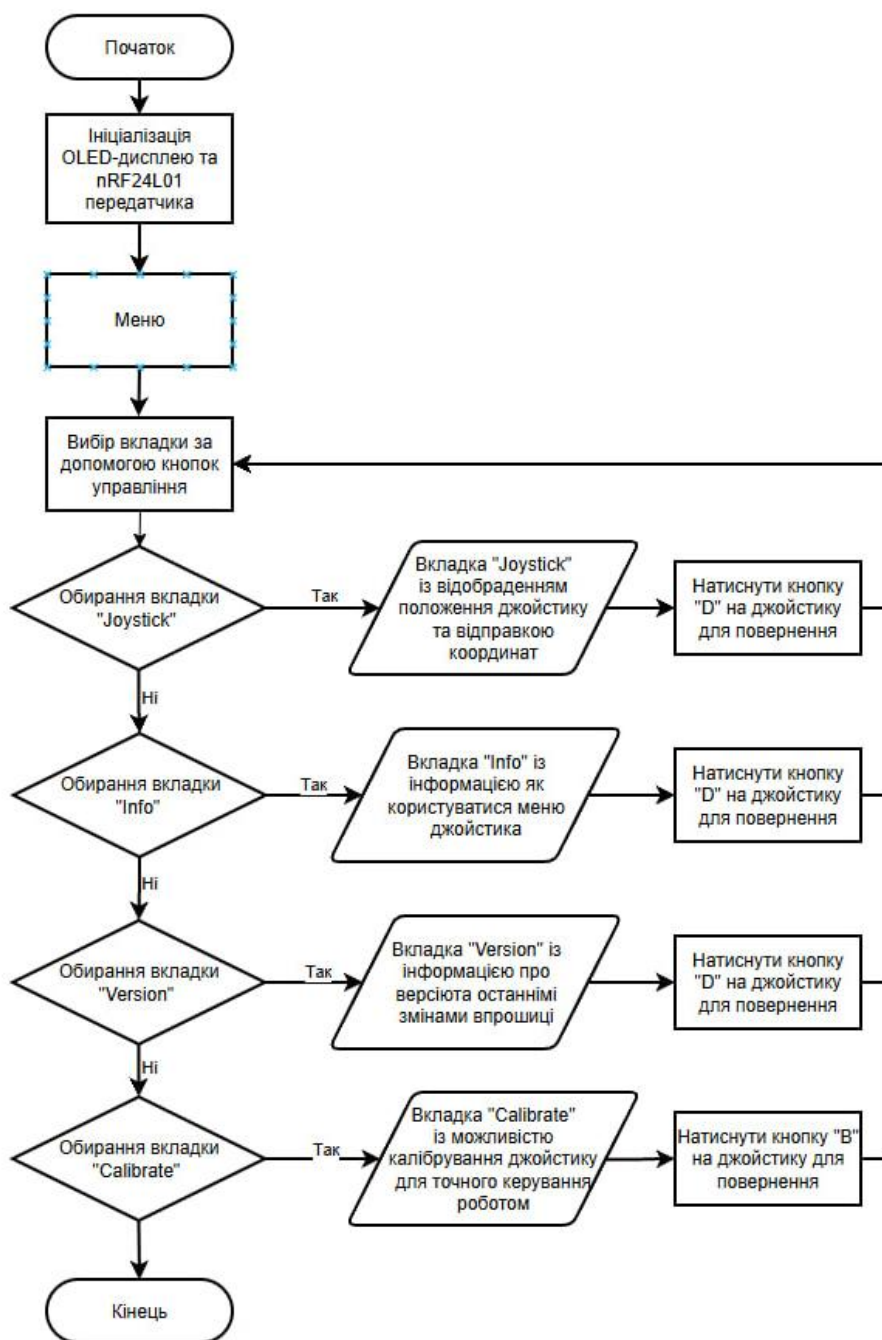


Рисунок 2.1 – Блок-схема логіки роботи пристрою

Подібна схема дозволяє не тільки раціонально організувати програмну логіку, а й краще зрозуміти вимоги до апаратної частини, яка буде описана у подальших розділах. Структурований підхід дає змогу в майбутньому вносити зміни до системи без повної перебудови її архітектури, що є суттєвою перевагою для навчальних, експериментальних або прикладних задач.

## 2.2 Логіка роботи системи

Функціонування системи дистанційного керування базується на циклічному обміні інформацією між користувачем і виконавчим пристроєм. В основі лежить безперервний процес зчитування стану елементів керування, обробки даних та передавання відповідних команд через бездротовий канал зв'язку. Паралельно відбувається приймання зворотних повідомлень, які можуть містити підтвердження отримання команд або інформацію про стан віддаленого об'єкта.

Загальну логіку роботи пристрою зображено на рисунку 2.1. Система розпочинає роботу з етапу ініціалізації, коли налаштовуються всі необхідні ресурси: обробка введення, інтерфейс, зв'язок, енергоощадні режими тощо. Далі відбувається постійне опитування джерел введення, аналіз дій користувача та формування керуючого сигналу у вигляді компактного пакету. Цей пакет передається через канал зв'язку у напрямку виконавчої частини системи.

Після передавання команда може супроводжуватися очікуванням підтвердження або відповіді. У разі отримання відповіді вона обробляється і, за необхідності, відображається на дисплеї або іншим способом повідомляється користувачу. Такий механізм забезпечує двосторонню взаємодію та дозволяє відстежувати ефективність виконання команд.

Схема роботи організована таким чином, щоб забезпечити автономність, гнучкість та можливість масштабування системи. Кожен блок функціонально незалежний, що дозволяє змінювати або розширювати логіку без потреби у повній перебудові системи. Такий підхід спрощує майбутню адаптацію пристрою під нові задачі або конфігурації.

## 2.3 Компонентна структура системи

У процесі проектування системи дистанційного керування важливо не лише визначити загальну логіку її функціонування, а й сформувати уявлення про основні функціональні блоки, які забезпечуватимуть її роботу. Незважаючи на

те, що конкретні апаратні складові будуть детально розглянуті у наступному розділі, вже на цьому етапі доцільно окреслити ключові елементи архітектури системи з точки зору їхнього функціонального призначення.

Кожен пристрій дистанційного керування передбачає наявність підсистеми введення, яка відповідає за зчитування дій користувача. Саме вона фіксує положення елементів керування, визначає натискання або переміщення, й таким чином формує вхідні сигнали для подальшої обробки. Обробка цих даних здійснюється в межах обчислювального блоку, який виконує логіку пристрою, формує пакети для передавання, а також приймає й аналізує інформацію, отриману у відповідь. Центральне місце у структурі системи займає модуль бездротового зв'язку, через який здійснюється обмін даними між пультом і виконавчим пристроєм. Залежно від обраної технології, цей обмін може бути одно- або двостороннім, мати різний рівень надійності, швидкості передачі та енергоспоживання. Важливим елементом є також підсистема виведення інформації, яка надає користувачу зворотний зв'язок. Залежно від конфігурації пристрою, вона може бути реалізована у вигляді дисплея, світлодіодної індикації або інших візуальних елементів, що дозволяють швидко орієнтуватися в поточному стані системи.

Узагальнено, логіка взаємодії між зазначеними блоками забезпечує повноцінне функціонування пристрою, дозволяючи реалізувати керування в режимі реального часу з можливістю масштабування та адаптації до різних сценаріїв використання. Такий підхід створює гнучку основу для подальшої реалізації як апаратної, так і програмної частини системи.

#### 2.4 Обмін даними між компонентами системи

Однією з ключових функцій системи дистанційного керування є ефективна організація обміну інформацією між передавальною та приймальною частинами. Від якості цього процесу залежать як точність виконання команд, так і загальна надійність пристрою. З огляду на це, ще на етапі проектування варто розглядати кілька варіантів реалізації зв'язку, кожен з яких має свої особливості, переваги

та обмеження.

Сучасні технології бездротового передавання даних пропонують різноманітні протоколи й стандарти. Серед них можна відзначити рішення, що працюють у діапазонах низької частоти, які зазвичай забезпечують добру прохідність сигналу, проте мають обмежену швидкість. Існують також платформи з середнім діапазоном частот, що забезпечують баланс між дальністю зв'язку та енергоспоживанням. Для задач, де критичною є швидкість передачі та обсяг даних, можуть використовуватись високочастотні технології, хоча вони часто вимагають стабільних умов середовища й більших енергетичних витрат.

У межах розробки системи передбачено використання двостороннього обміну даними. Така модель дозволяє не лише надсилати команди від пульта до виконавчого елемента, а й отримувати зворотний зв'язок у вигляді підтвердження, повідомлень про стан або діагностичної інформації. Для забезпечення стабільності передавання використовується система структурованих пакетів, які включають усі необхідні параметри: значення введення, контрольні байти, службові ознаки тощо. Подібний підхід дозволяє мінімізувати ймовірність помилок, особливо при роботі в умовах зашумленого радіоефіру або при наявності перешкод (табл. 2.1).

Передавання й приймання пакетів реалізується в межах єдиного циклу, в якому пульт спочатку генерує керуючий сигнал, надсилає його через канал зв'язку, а потім очікує на відповідь (рис. 2.2). У разі втрати з'єднання або порушення цілісності пакета, система може повторити запит або ініціювати обробку помилки. Такий механізм дозволяє реалізувати елементарну перевірку коректності передачі та дотримання логіки послідовності команд.

Завдяки такій організації процес обміну даними відбувається безперервно та передбачувано, що особливо важливо для систем, що працюють у режимі реального часу. Це створює основу для надійної взаємодії між усіма компонентами системи.

Таблиця 2.1 – Структура пакету даних, що передається

Поле пакету	Тип даних	Діапазон значень	Опис
X	int	0-100	Нормалізоване положення стика по осі X (0 – вліво, 100 – вправо)
Y	int	0-100	Нормалізоване положення стика по осі Y (0 – вниз, 100 – вгору)

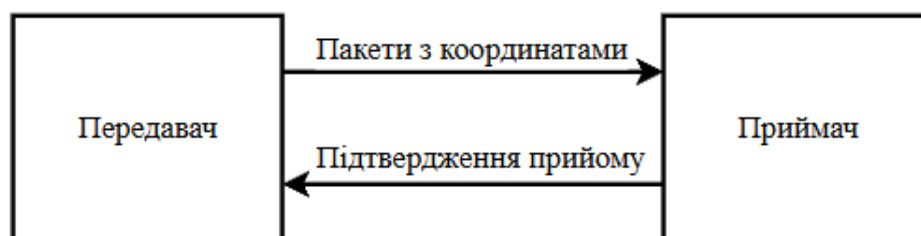


Рисунок 2.2 – Обмін даними між передавачем і приймачем

## 2.5 Порівняльна характеристика технологій бездротового зв'язку

При створенні системи дистанційного керування одним із ключових етапів є вибір методу обміну даними. Від обраної технології зв'язку залежать багато критичних параметрів: дальність дії, швидкість передавання, надійність з'єднання, енергоспоживання та складність реалізації. З огляду на це, на етапі проєктування доцільно здійснити порівняльний аналіз найбільш поширених технологій бездротової передачі, які потенційно можуть використовуватись у подібних системах.

Серед технологій низького рівня складності часто застосовуються рішення на основі радіочастоти 433 МГц. Вони відзначаються простою реалізацією та невеликою вартістю, однак мають обмежену швидкість передавання даних і зазвичай не підтримують зворотного зв'язку. Для систем, орієнтованих на

взаємодію з мобільними пристроями, доцільним варіантом є використання Bluetooth-модулів. Такі модулі зручні у налаштуванні й забезпечують стабільний зв'язок на невеликих відстанях, однак мають обмежену дальність та можуть бути чутливими до перешкод у навколишньому середовищі.

Технології на основі Wi-Fi вирізняються високою пропускну здатністю та дозволяють реалізовувати передачу значних обсягів даних у мережевому середовищі. Їхнім недоліком є високе енергоспоживання та потреба в наявності відповідної інфраструктури. Альтернативним варіантом для систем, що вимагають великої дальності передавання, але не потребують високої швидкості, може бути LoRa – енергоефективна технологія з широким покриттям, яка, однак, має низьку пропускну здатність і значні затримки. Ще однією групою варіантів є модулі, що працюють у діапазоні 2.4 ГГц, наприклад, системи із вбудованою підтримкою двостороннього зв'язку, які забезпечують добрий баланс між швидкістю, стабільністю та енергоспоживанням.

Щоб узагальнити ключові технічні характеристики різних варіантів, у таблиці 2.2 подано стислий порівняльний аналіз поширених технологій бездротового зв'язку, які можуть бути використані у проєктах даного типу.

Таким чином, обмін даними є центральним елементом взаємодії у системі, що пов'язує окремі функціональні блоки в єдину керовану структуру. Від правильності реалізації цієї частини залежить стабільність роботи пристрою, своєчасне виконання дій та комфорт користувача.

Таблиця 2.2 – Порівняння технологій бездротового зв'язку для систем дистанційного керування

Назва технології	Опис	Переваги	Недоліки
RF 433 MHz	Простий аналоговий або цифровий радіоканал	Дешевизна, простота реалізації	Низька швидкість, відсутність зворотного зв'язку

Продовження таблиці 2.2

Назва технології	Опис	Переваги	Недоліки
Bluetooth (наприклад, HC-05)	Стандарт для передачі даних на короткі відстані	Сумісність із телефонами, просте налаштування	Обмежена дальність, нестабільна у складних умовах
Wi-Fi (ESP8266 / ESP32)	Швидкісний цифровий зв'язок через мережу TCP/IP	Висока швидкість, підтримка великих даних	Підвищене енергоспоживання, потреба в інфраструктурі
LoRa	Низькошвидкісний протокол з великою дальністю	Наддалека передача, висока стабільність	Низька пропускна здатність, висока затримка
2.4 GHz (nRF, XBee)	Цифровий канал з можливістю зворотного зв'язку	Надійність, низьке споживання енергії	Обмежена дальність у замушлених середовищах

Як видно з порівняльної таблиці, кожна з технологій має свої переваги та обмеження, що слід враховувати залежно від умов експлуатації та вимог до системи. Для задач, де критичною є дальність дії або стабільність з'єднання, доцільно використовувати технології з високою прохідністю сигналу. Натомість, у випадках, коли важливі компактність, інтеграція з мобільними пристроями чи висока швидкість передавання – перевагу варто надавати більш сучасним цифровим рішенням. Вибір оптимального варіанта повинен базуватись на балансі між функціональністю, енергоефективністю та складністю реалізації.

### 3 ВИБІР АПАРАТНИХ КОМПОНЕНТІВ ТА ОБҐРУНТУАННЯ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Процес побудови будь-якої електронної системи, зокрема пульта дистанційного керування, тісно пов'язаний із правильним вибором технічних засобів, які забезпечать реалізацію запланованої функціональності. На цьому етапі були визначені основні апаратні складові, виходячи з їхніх характеристик, доступності, сумісності між собою та доцільності застосування у рамках поставленого завдання.

Ключовим елементом обраної системи став мікроконтролер Arduino Uno, що поєднує у собі зручність програмування, надійність та розширюваність. Завдяки наявності необхідної кількості аналогових і цифрових входів/виходів, а також підтримці таких інтерфейсів як SPI та I2C, ця плата виявилась ідеальною основою для реалізації як обробки сигналів, так і взаємодії з периферійними пристроями. Крім того, Arduino Uno підтримується великою спільнотою розробників, що значно полегшує процес налагодження та вдосконалення проєкту (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Мікроконтролер Arduino UNO, обраний для реалізації пульта

Для реалізації функцій введення управлінських команд застосовано аналоговий джойстик типу Funduino, який дозволяє визначати положення ручки по двох координатах – X та Y. Цей елемент забезпечує інтуїтивне керування та має вбудовану кнопку, що розширює можливості керування. Додатково було застосовано ще кілька кнопок, які виконують функції перемикання між елементами меню, підтвердження вибору та повернення назад. З метою спрощення схеми кнопки підключаються безпосередньо до цифрових входів мікроконтролера з використанням внутрішніх підтягуючих резисторів (рис. 3.2).

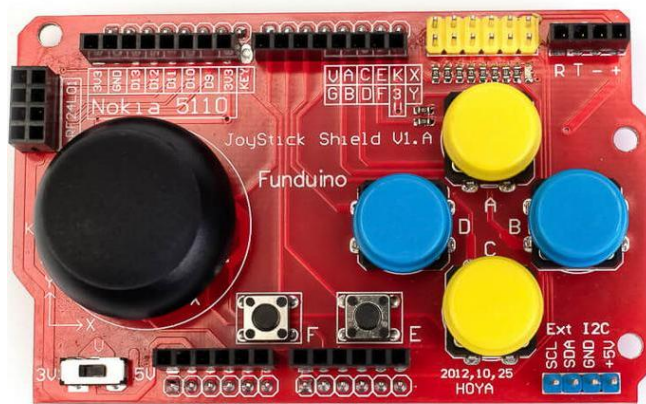


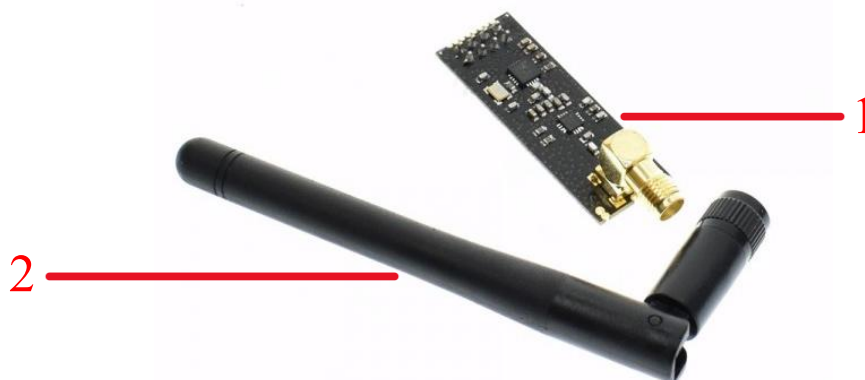
Рисунок 3.2 – Джойстик Funduino з вбудованою кнопкою

Одним із ключових аспектів функціонування пульта є наявність бездротового зв'язку, який реалізовано за допомогою модуля nRF24L01. Цей модуль працює на частоті 2,4 ГГц, має низьке енергоспоживання та підтримує як передачу, так і прийом даних, що робить його ідеальним рішенням для побудови надійного каналу зв'язку між передавачем і приймачем. Підключення модуля до Arduino здійснюється через інтерфейс SPI, що забезпечує високу швидкість обміну та стабільність передавання даних (рис. 3.3).

Важливою перевагою nRF24L01 є підтримка багатоканального режиму роботи, що дозволяє уникати завад при наявності інших пристроїв, які працюють у тому ж частотному діапазоні. Це особливо актуально в умовах насиченого радіоефіру, де можуть спостерігатися перешкоди від Wi-Fi або Bluetooth-сигналів. Крім того, модуль підтримує короткі пакети даних зі змінною

довжиною, що дозволяє оптимізувати швидкодію системи та зменшити обсяг переданого трафіку.

На практиці використання цього модуля забезпечує надійний обмін у межах типових приміщень на відстані до 10 метрів навіть за наявності перешкод. Таким чином, nRF24L01 поєднує в собі компактність, ефективність та функціональну гнучкість, що робить його одним із найдоцільніших варіантів для систем дистанційного керування на базі мікроконтролерів.



1 – Модуль nRF24L01

2 – Антена для nRF24L01

Рисунок 3.3 – Радіомодуль nRF24L01 з антеною

Візуалізація інформації, яка виводиться користувачеві, реалізується за допомогою OLED-дисплея з роздільною здатністю 128×64 пікселі. Завдяки високій контрастності та низькому енергоспоживанню цей компонент дозволяє відображати графічні елементи інтерфейсу, меню, координати джойстика, інформаційні повідомлення та інші дані, необхідні для ефективної взаємодії оператора з пристроєм (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – OLED-дисплей для виводу даних користувачеві

Не менш важливим є питання автономності роботи пульта. Для забезпечення живлення обрано літій-іонний акумулятор типу 18650 з ємністю 2000 мА·г, що дає змогу працювати пристрою протягом тривалого часу без підзарядки. Акумулятор підключено через модуль TP4056, який виконує функцію контролю заряду та захисту. Для стабілізації вихідної напруги використовується DC-DC перетворювач, який дозволяє підвищити напругу до рівня, необхідного для живлення всіх елементів системи (рис. 3.7).

Таким чином, обрані апаратні компоненти забезпечують баланс між функціональністю, надійністю та енергоефективністю. Вони дають змогу реалізувати повноцінний пульт дистанційного керування із зручним інтерфейсом та стабільним бездротовим зв'язком.

Обрана апаратна складова пульта дистанційного керування представлена узгодженою системою, детальна структурна організація якої наведена на схемах нижче.

На рисунку 3.5 зображена схема живлення пульта, що ілюструє підключення акумулятора, зарядного модуля та стабілізатора напруги. Водночас рисунок 3.6 демонструє принципову схему підключення основних компонентів системи – мікроконтролера, джойстика, бездротового модуля та OLED-дисплея, що забезпечує коректну взаємодію та управління всією системою.



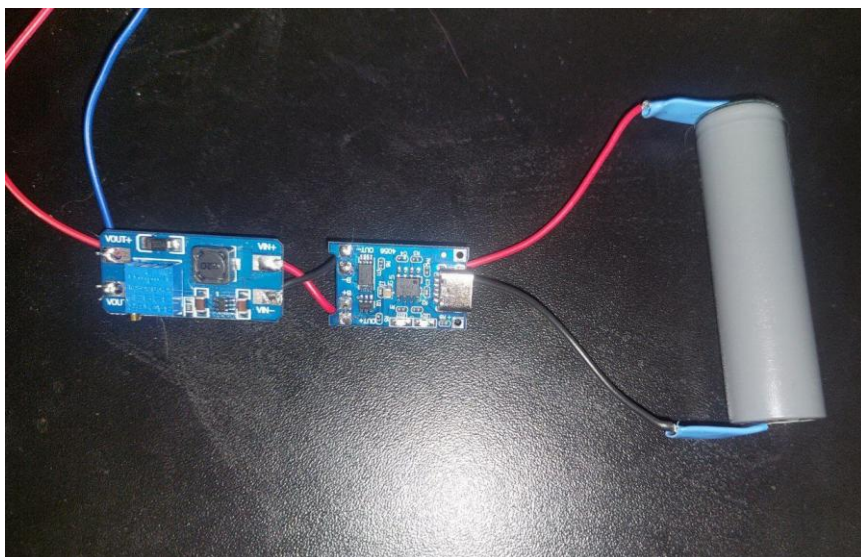


Рисунок 3.7 – Система живлення на базі 18650, TP4056 та DC-DC-конвертера

## 4 ЗБИРАННЯ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНОГО ТА ПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

### 4.1 Загальна архітектура та логіка передавача

Передавальний пристрій, що виконує роль пульта дистанційного керування, є основною ланкою системи, через яку оператор взаємодіє з віддаленим виконавчим модулем. Його функціонування базується на зчитуванні дій користувача, обробці введеної інформації, формуванні керуючих команд і передачі їх за допомогою бездротового зв'язку. Водночас на OLED-дисплей виводяться необхідні дані про стан системи, що забезпечує базовий зворотний зв'язок. Архітектура пульта передбачає модульність – усі функціональні блоки реалізовані у вигляді незалежних програмних компонентів, які взаємодіють через загальний цикл обробки.

### 4.2 Система введення: зчитування стика та кнопок

Для забезпечення точного та надійного управління пультом дистанційного керування необхідно коректно зчитувати та опрацьовувати сигнали, що надходять від джойстика Funduino та цифрових кнопок.

Аналоговий стик джойстика має два канали, які відповідають за переміщення по осях X та Y. Ці сигнали подаються у вигляді аналогових напруг на відповідні аналогові входи мікроконтролера Arduino Uno. Значення напруги безперервно зчитуються з допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача (ADC) із розрядністю 10 біт, що забезпечує діапазон від 0 до 1023.

Для отримання більш корисної інформації від сирих даних використовується функція масштабування (map), яка перетворює діапазон значень ADC у логічні величини, що відповідають різним напрямкам та рівням інтенсивності руху. Наприклад, центральне положення стика відповідає приблизно середньому значенню ADC, а відхилення у будь-яку сторону

визначає відповідний напрямок та силу команди.

Фрагмент коду, що реалізує масштабування сигналів від джойстика:

```
int x = analogRead(pinJoyX);
  int y = analogRead(pinJoyY);
  int normX = isCalibrated ? map(x, joyMinX, joyMaxX, 0, 100) : map(x, 0, 1023, 0, 100);
  int normY = isCalibrated ? map(y, joyMinY, joyMaxY, 100, 0) : map(y, 0, 1023, 100, 0);

  normX = constrain(normX, 0, 100);
  normY = constrain(normY, 0, 100);
```

Цей фрагмент демонструє, як програма зчитує та нормалізує координати стіка для подальшого передавання.

Для уникнення небажаних коливань сигналу у межах мертвої зони (dead zone) встановлено поріг нечутливості. Значення стіка, що потрапляють у цей діапазон, ігноруються програмою, що зменшує випадкові зміщення і підвищує стабільність управління.

Кнопки підключені до цифрових входів Arduino з використанням внутрішніх підтягуючих резисторів. Така схема дозволяє уникнути підключення зовнішніх резисторів та знижує загальну складність апаратної частини. При відсутності натискання на вході спостерігається логічна одиниця, а при натисканні кнопки – логічний нуль.

Програмне забезпечення опитує стан кнопок з певною періодичністю, фільтруючи короткочасні шуми за допомогою програмної антидребезгової обробки (debouncing). Це забезпечує коректну фіксацію натискань і запобігає множинним спрацьовуванням при одному натисканні.

Оброблені сигнали з аналогового стіка та цифрових кнопок об'єднуються у структуру даних, що відповідає протоколу передачі. Для кожного напрямку та кнопки призначені унікальні коди команд, які передаються по бездротовому каналу.

Завдяки чіткій обробці аналогових сигналів система забезпечує плавне та точне управління рухом виконавчого механізму, а робота з кнопками дає змогу змінювати режими та викликати додаткові функції пульта.

### 4.3 Інтерфейс OLED-дисплея та структура меню

Інтерфейс користувача пульта дистанційного керування реалізовано за допомогою OLED-дисплея, що є одним із ключових елементів системи взаємодії оператора з пристроєм. OLED-дисплей характеризується високою контрастністю, широким кутом огляду та низьким енергоспоживанням, що робить його ідеальним для використання в портативних електронних пристроях. Меню, представлене на дисплеї, складається з кількох вкладок, які логічно структуровані для зручного доступу до різних функціональних блоків пульта. Перемикання між вкладками здійснюється за допомогою кнопок джойстика, що забезпечує інтуїтивно зрозуміле та швидке керування без додаткових зовнішніх пристроїв (див. рисунок 4.1).

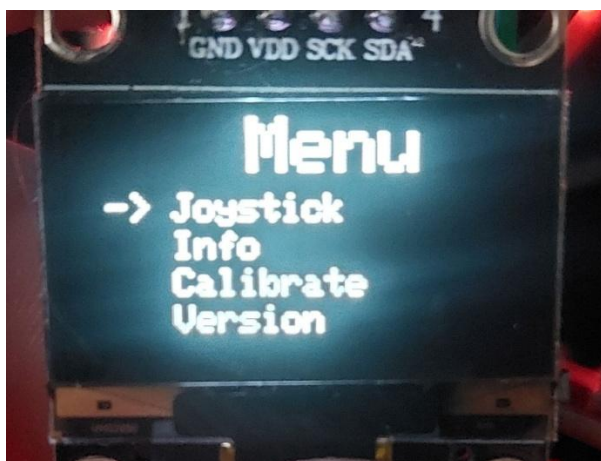


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд головного меню на OLED-дисплеї пульта

Перша вкладка відображає поточний стан джойстика, зокрема значення координат нахилу стика по осях X і Y. Ця інформація має важливе значення для оператора, оскільки дозволяє візуально контролювати положення стика в реальному часі, що особливо необхідно при точному керуванні роботизованими або дистанційно керованими системами. Наявність такого зворотного зв'язку підвищує ефективність управління та дозволяє швидко реагувати на зміни ситуації (див. рисунок 4.2).

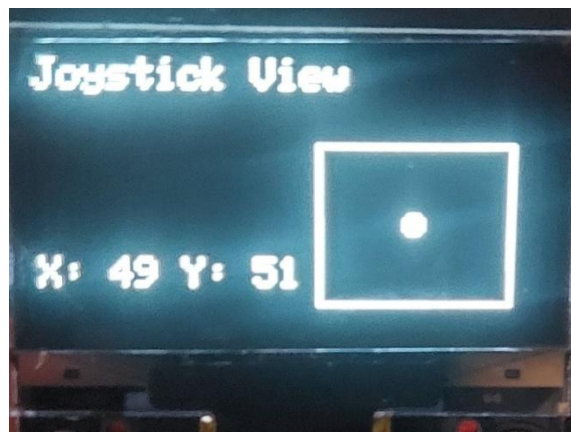


Рисунок 4.2 – Відображення координат джойстика у вкладці “Joystick”

Друга вкладка служить своєрідним довідником із основ управління меню. Вона містить детальні рекомендації щодо використання кнопок для навігації між різними пунктами меню, вибору необхідних функцій та повернення до попередніх екранів. Це особливо корисно для користувачів, які вперше працюють з пристроєм, або у випадках, коли потрібно швидко освіжити знання щодо організації інтерфейсу. Таким чином, ця вкладка сприяє зручності експлуатації та мінімізує ймовірність помилок під час користування (див. рисунок 4.3).

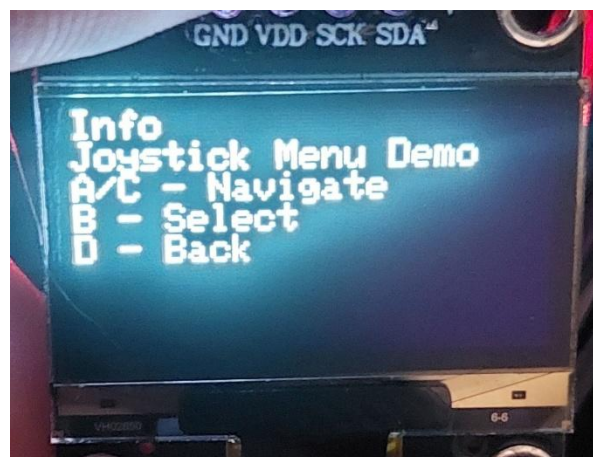


Рисунок 4.3 – Екран з інструкцією по навігації в меню

Третя вкладка призначена для калібрування джойстика – важливого процесу, який гарантує коректність зчитування координат стика. Калібрування

дозволяє компенсувати можливі відхилення, пов'язані з фізичним зносом чи заводськими особливостями пристрою, що забезпечує високу точність та стабільність передачі команд. У цьому розділі користувач може ініціювати процедуру калібрування та отримати зворотній зв'язок про її результати, що підвищує надійність роботи всієї системи дистанційного керування (див. рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Процес калібрування джойстика на дисплеї

Четверта вкладка містить інформацію про версію встановленого програмного забезпечення, що є важливим для технічного супроводу пульта. Відображення цієї інформації дозволяє користувачеві переконатися у відповідності версії ПО актуальним вимогам, а також полегшує діагностику та оновлення системи в майбутньому. Наявність такого функціоналу свідчить про продуманість дизайну пульта та увагу до деталей в процесі розробки (див. рисунок 4.5).

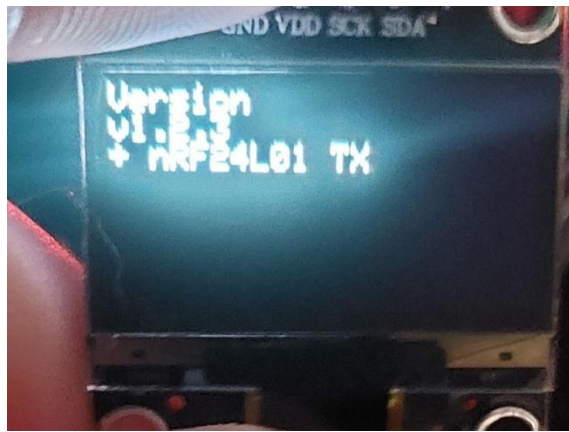


Рисунок 4.5 – Відображення версії програмного забезпечення на дисплеї

Для реалізації графічного інтерфейсу меню використовується окрема функція `showMenu()`, яка відповідає за виведення заголовку та списку вкладок на OLED-дисплей з відповідним маркуванням активного пункту. Наведений нижче фрагмент демонструє структуру цієї функції:

```
void showMenu() {
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(2);
    display.setCursor((SCREEN_WIDTH - 6 * 5) / 2, 0);
    display.println("Menu");
    display.setTextSize(1);

    for (int i = 0; i < menuCount; i++) {
        display.setCursor(10, 20 + i * 10);
        if (i == menuIndex) display.print("-> ");
        else display.print(" ");

        switch (i) {
            case 0: display.println("Joystick"); break;
            case 1: display.println("Info"); break;
            case 2: display.println("Calibrate"); break;
            case 3: display.println("Version"); break;
        }
    }
    display.display();
}
```

#### 4.4 Структура програмного забезпечення передавального пристрою

Програмне забезпечення пульта дистанційного керування побудоване за модульною структурою, що забезпечує зрозумілу організацію коду, спрощує тестування й дозволяє легко масштабувати функціональність у майбутньому. Основна логіка роботи умовно поділена на три ключові компоненти: модуль навігації меню, модуль збору та передачі даних, а також модуль виведення інформації на дисплей.

Модуль меню відповідає за організацію інтерфейсу користувача. Він обробляє натискання кнопок, зміну вкладок та інші взаємодії, що дозволяють користувачу переміщатися між основними функціональними екранами. Реалізація навігації передбачає фіксовану кількість вкладок, зокрема “Joystick status” і “Statistics”, між якими можна перемикатися за допомогою кнопок, інтегрованих у пульт. Такий підхід дозволяє швидко отримувати доступ до потрібної інформації, не перевантажуючи інтерфейс зайвими елементами.

Модуль обробки введення виконує зчитування координат стика по осях X та Y, а також відслідковує стан кнопок. Отримані значення аналізуються, нормалізуються та упорядковуються у вигляді компактної структури, придатної для передачі через бездротовий зв'язок. Передавання даних відбувається у циклічному режимі, що забезпечує постійне оновлення сигналу навіть за відсутності змін. Така реалізація дозволяє зберігати стабільне з'єднання з приймальним пристроєм і швидко реагувати на дії користувача.

Модуль виведення інформації реалізує оновлення дисплея залежно від активної вкладки. Наприклад, при перемиканні на сторінку "Joystick status" на екрані відображаються координати стика, їх візуальне розміщення, стан кнопок тощо. У вкладці “Statistics” виводиться загальна кількість переданих пакетів або інші діагностичні дані, які можуть бути корисними під час налагодження системи. Графічне представлення інформації реалізоване з урахуванням обмежень дисплея і з пріоритетом до швидкості оновлення та зручності сприйняття.

Завдяки такому поділу на логічні частини, програмне забезпечення пульта

залишається зрозумілим, підтримуваним і гнучким. Кожен модуль може бути вдосконалений окремо без необхідності зміни основної структури системи, що відкриває можливості для подальшого розвитку функціоналу та оптимізації взаємодії з користувачем.

#### 4.5 Принцип організації обміну даними

Для організації бездротової передачі даних між пультом дистанційного керування та приймачем у розглянутій системі використовується радіомодуль nRF24L01, який належить до сімейства високотехнологічних бездротових пристроїв з роботою у частотному діапазоні 2,4 ГГц. Даний модуль забезпечує не лише високу швидкість передачі інформації, але й відзначається підвищеною надійністю та енергоефективністю, що є вкрай важливим для автономних портативних пристроїв.

Обмін даними в системі відбувається у вигляді пакетів фіксованої довжини, що значно спрощує процедуру обробки сигналів, а також знижує ймовірність виникнення помилок при передачі. Кожен пакет містить необхідну інформацію про координати джойстика та стан цифрових кнопок, що дозволяє відтворити актуальний стан пульта на стороні приймача у режимі реального часу. Крім того, модуль підтримує механізми автоматичного повтору передачі у разі відсутності підтвердження прийому, що значно підвищує стійкість зв'язку навіть в умовах радіоперешкод або нестабільного радіочастотного середовища.

Важливою складовою успішної роботи бездротової системи є програмне забезпечення пульта, яке реалізує ініціалізацію радіомодуля, налаштування параметрів роботи, зокрема вибір каналу зв'язку, швидкість передачі даних, а також обробку подій, пов'язаних із передачею та прийомом інформації. Використання бібліотеки RF24 значно спрощує роботу з модулем nRF24L01, надаючи розробнику зрозумілий та ефективний інтерфейс для керування усіма аспектами бездротової комунікації.

Нижче наведено фрагмент коду, що відповідає за ініціалізацію модуля nRF24L01 та передачу даних із пульта до приймача:

```

// Ініціалізація радіомодуля nRF24L01
radio.begin();
radio.setPALevel(RF24_PA_LOW);
radio.setDataRate(RF24_1MBPS);
radio.setChannel(100);
radio.openWritingPipe(address);
radio.stopListening();

// Передача координат джойстика
JoystickData data = {x, y};
radio.write(&data, sizeof(data));

// Передача координат джойстика
JoystickData data = {x, y};
radio.write(&data, sizeof(data));

```

Передача даних здійснюється у вигляді структурованих пакетів, що містять закодовані значення координат джойстика та стану кнопок пульта. Такий підхід забезпечує високу швидкість оновлення стану керування, дозволяючи реалізувати плавний, точний та надійний контроль над віддаленим пристроєм. Окрім цього, двонаправлений характер зв'язку дозволяє не лише передавати команди, а й отримувати підтвердження їхнього прийому, що є ключовим фактором для запобігання втраті інформації та підвищення загальної стабільності роботи системи.

Таким чином, застосування модуля nRF24L01 у якості основного засобу бездротового зв'язку в пульті дистанційного керування є цілком обґрунтованим і оптимальним рішенням, яке дозволяє поєднати високу продуктивність, енергоефективність та надійність, необхідні для сучасних вбудованих систем із дистанційним управлінням.

#### 4.6 Загальна структура приймального пристрою

Приймальний пристрій, що входить до складу системи дистанційного керування, виконує надзвичайно важливу функцію – обробку бездротових

сигналів, які надходять від передавального модуля пульта. Основною метою приймача є зчитування координат положення стика на пульті керування та відображення отриманої інформації у візуальній формі, зокрема за допомогою системи індикації на базі світлодіодів. Такий підхід дозволяє ефективно реалізувати зворотний зв'язок і візуально демонструє зміну керуючої дії, що є ключовим аспектом для систем, які працюють у реальному часі.

Конструктивно приймач реалізований на базі популярного мікроконтролера Arduino Nano, який обрано завдяки компактним розмірам, широкій підтримці бібліотек, простоті у програмуванні та достатньому числу цифрових входів/виходів для реалізації поставлених задач. Arduino Nano побудований на мікроконтролері ATmega328P і має достатню обчислювальну потужність для обробки входних радіосигналів, аналізу координат і керування виконавчими елементами. Його використання дозволяє уникнути надмірної складності як у апаратній частині, так і у програмному забезпеченні, зберігаючи при цьому повну функціональність пристрою.

Основним елементом приймального тракту є модуль nRF24L01, що забезпечує двосторонній радіозв'язок на частоті 2,4 ГГц. Даний модуль підтримує передачу даних зі швидкістю до 2 Мбіт/с (у даній реалізації використовується 1 Мбіт/с для стабільності), має вбудовані механізми виявлення колізій та повторної передачі пакетів, що дозволяє істотно знизити ймовірність втрати інформації навіть за наявності радіоперешкод. Крім того, модуль має низький рівень енергоспоживання, що дозволяє використовувати його в автономних системах без необхідності у складних схемах живлення. У конструкції приймача модуль підключений до Arduino Nano через інтерфейс SPI, а керування здійснюється за допомогою бібліотеки RF24, яка забезпечує високий рівень абстракції та зручності у розробці програмного забезпечення.

Ще одним важливим компонентом приймача є система індикації, реалізована на основі чотирьох світлодіодів, кожен з яких закріплений за певним напрямком: вперед, назад, вліво та вправо. Світлодіоди підключені до окремих цифрових виходів Arduino Nano та активуються відповідно до напрямку, в якому

було відхилено стик на пульті керування. Це дозволяє отримати наочне представлення інформації, яка надходить по радіоканалу, і підтверджує, що зв'язок між пультом і приймачем працює коректно. Такий тип інтерфейсу є простим, але водночас ефективним способом реалізації одностороннього зворотного зв'язку, особливо на етапах тестування та відлагодження системи.

Живлення всієї конструкції може здійснюватися як від джерела постійної напруги (наприклад, через USB-інтерфейс або стабілізований блок живлення 5В), так і від автономного джерела, наприклад, Li-ion акумулятора із зарядним модулем TP4056 та підвищуючим перетворювачем. З огляду на мінімальне енергоспоживання модулів, приймальна частина системи може працювати тривалий час без підзарядки, що робить її придатною для використання у мобільних або польових умовах.

Загалом, уся апаратна частина приймача характеризується простотою, компактністю, енергоефективністю та високою надійністю. Обрані компоненти добре поєднуються між собою як на рівні електричних характеристик, так і на рівні логіки взаємодії, що дозволяє легко масштабувати систему в майбутньому або інтегрувати додаткові функціональні модулі (наприклад, звукову індикацію, дисплей, зворотній канал передачі тощо).

Таким чином, приймач у представленому варіанті є ефективним, недорогим та технологічно простим рішенням для прийому та обробки сигналів у системі дистанційного керування, виконуючи усі покладені на нього функції з високою точністю та швидкодією. Схему підключення приймача можна побачити на рисунку 4.6.

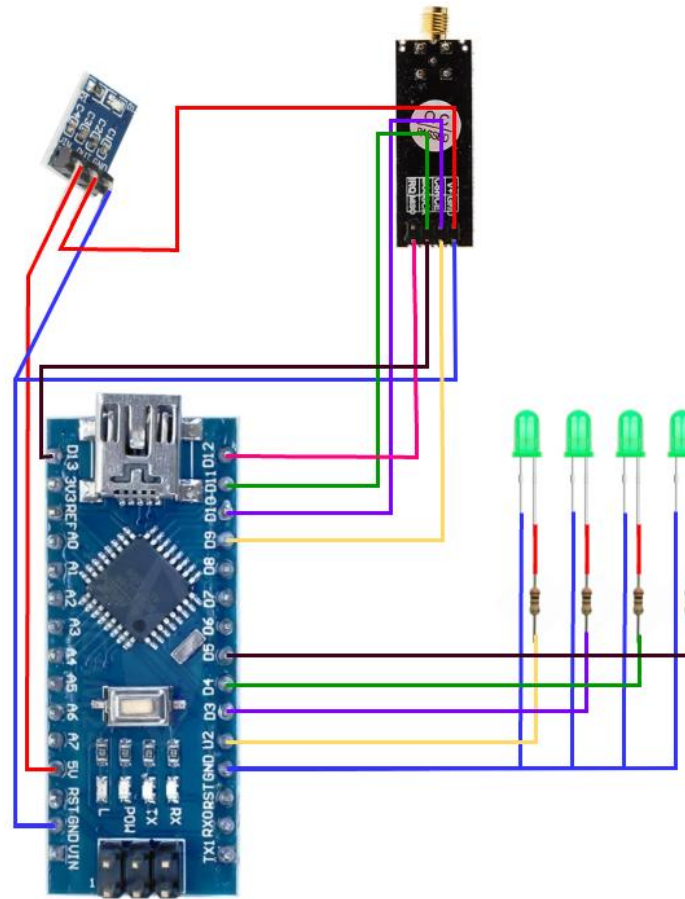


Рисунок 4.6 – Схема підключення приймача

#### 4.7 Приймання та обробка координат на приймальному пристрої

Приймальний пристрій системи дистанційного керування побудований на базі мікроконтролера Arduino Nano з радіомодулем nRF24L01, який забезпечує бездротовий прийом даних. Прийом координат стика виконується шляхом перевірки наявності нових пакетів інформації у радіоканалі.

При отриманні сигналу з пульта відбувається зчитування структури JoystickData, що містить нормалізовані значення координат по осях X та Y у діапазоні від 0 до 100. Центральне положення стика прийнято за 50, що відповідає положенню без відхилення.

У програмній логіці пристрою здійснюється перевірка наявності даних наступним чином:

```
if (radio.available()) {
    JoystickData data;
    radio.read(&data, sizeof(data));
```

У програмній логіці пристрою здійснюється перевірка наявності даних наступним чином:

Після зчитування координат виконується фільтрація незначних коливань, що відокремлює реальні рухи стика від шумових сигналів. Для цього встановлено порогове значення (threshold), наприклад, 15 одиниць.

Обчислення відхилення координат від центрального положення проводиться як різниця:

```
const int center = 50;
const int threshold = 15;

int deltaX = data.x - center;
int deltaY = data.y - center;
```

Якщо абсолютні значення обох відхилень не перевищують порогу, вважається, що стик знаходиться у спокої, і світлодіодна індикація не активується. В іншому випадку пристрій визначає домінуючий напрямок руху стика, порівнюючи абсолютні значення deltaX та deltaY. Це дозволяє визначити, чи відхилення відбулося по горизонталі чи вертикалі, та спрямувати відповідний сигнал на відповідний світлодіод.

Таким чином, описана логіка забезпечує точне та надійне відображення стану стика пульта, що є необхідною умовою для коректної роботи дистанційного керування.

#### 4.8 Обробка команд і керування виконавими елементами

Для візуального відображення напрямку відхилення стика в приймальному пристрої використовуються чотири світлодіоди, кожен з яких відповідає одному з напрямків: вперед (вгору), назад (вниз), вліво та вправо. Управління світлодіодами здійснюється через цифрові виходи мікроконтролера Arduino Nano (див. табл. 4.1).

Перед обробкою нового прийнятого пакета координат усі світлодіоди переводяться у вимкнений стан, що запобігає одночасному горінню декількох індикаторів і забезпечує чіткість індикації:

```
digitalWrite(ledForward, LOW);
digitalWrite(ledBackward, LOW);
digitalWrite(ledLeft, LOW);
digitalWrite(ledRight, LOW);
```

Далі, на основі отриманих координат стика, визначається відхилення по осях X та Y від центрального положення (50). Для цього обчислюються значення:

```
const int center = 50;
const int threshold = 15;

int deltaX = data.x - center;
int deltaY = data.y - center;
```

Якщо абсолютні значення обох відхилень не перевищують встановленого порогового значення, система вважає, що стик знаходиться у нейтральній позиції, і всі світлодіоди залишаються вимкненими.

У разі значного відхилення визначається домінуючий напрямок руху. Для цього порівнюються абсолютні значення  $\text{deltaX}$  та  $\text{deltaY}$ . Якщо вертикальне відхилення переважає (тобто  $\text{abs}(\text{deltaY}) \geq \text{abs}(\text{deltaX})$ ), активується відповідний світлодіод:

- якщо  $\text{deltaY}$  додатне, включається світлодіод напрямку "вперед" (вгору);
- якщо  $\text{deltaY}$  від'ємне, включається світлодіод напрямку "назад" (вниз).

В іншому випадку (домінує горизонтальне відхилення):

- якщо  $\text{deltaX}$  додатне, вмикається світлодіод напрямку "вправо";
- якщо  $\text{deltaX}$  від'ємне, вмикається світлодіод напрямку "вліво".

Фрагмент коду, що реалізує цю логіку, наведено нижче:

```
if (abs(deltaY) >= abs(deltaX)) {
    if (deltaY > 0) {
        digitalWrite(ledForward, HIGH);
    } else {
        digitalWrite(ledBackward, HIGH);
    }
} else {
    if (deltaX > 0) {
        digitalWrite(ledRight, HIGH);
    } else {
        digitalWrite(ledLeft, HIGH);
    }
}
```

}

Такий підхід дозволяє забезпечити однозначну та інтуїтивно зрозумілу індикацію напрямку відхилення стика, що є важливим для користувача під час керування пультом.

Таблиця 4.1 – Піни приймача

Назва компонента	Пін Arduino Nano	Призначення
LED вперед	D2	Світлодіоди напрямку вперед
LED назад	D3	Світлодіоди напрямку назад
LED вліво	D4	Світлодіоди напрямку вліво
LED вправо	D5	Світлодіоди напрямку вправо
CE (nRF24L01)	D9	Керування модулем nRF24L01
CSN (nRF24L01)	D10	SPI CS для nRF24L01
SPI (MISO, MOSI, SCK)	D11-13	SPI шина для nRF24L01

#### 4.9 Висновки

У межах цього розділу реалізовано обидві частини системи дистанційного керування: передавальний пристрій (пульт) та приймальний блок. Було здійснено збирання апаратної частини пульта з урахуванням ергономіки, портативності та інтеграції основних функціональних елементів. Розроблена програмна логіка забезпечує зчитування координат стика, формування керуючих команд, їх виведення на дисплей та передачу через бездротовий канал зв'язку.

Приймальний пристрій реалізовано як автономний модуль, здатний стабільно приймати дані, розпізнавати напрямок і активувати відповідні виконавчі елементи. Його структура дозволяє легко адаптувати логіку під інші типи навантаження або зворотного зв'язку без необхідності суттєвих змін у кодї. Обмін даними реалізовано у вигляді структурованих пакетів, що забезпечує

точність, передбачуваність і гнучкість подальшого розширення функціоналу.

Структура програмного забезпечення побудована за модульним принципом, що дозволяє незалежно змінювати або доповнювати окремі функції без втручання в основний цикл роботи. Таке рішення суттєво полегшує налагодження системи, а також дає змогу легко адаптувати пристрій під нові вимоги – наприклад, додавання зворотного каналу зв'язку, нових інтерфейсів або зміну типу індикації.

Загалом, отримана система демонструє цілісну архітектуру, високу керованість, а також можливість масштабування під різні завдання без необхідності повної перебудови програмної логіки. Реалізовані рішення забезпечують як функціональність, так і гнучкість, необхідну для ефективного використання у реальних умовах експлуатації.

## 5 ТЕСТУВАННЯ ТА НАЛАГОДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

### 5.1 Методики тестування

Після завершення розробки системи дистанційного керування було прийнято рішення провести практичні випробування, аби перевірити, наскільки вона відповідає очікуванням щодо стабільності, зручності використання та загальної надійності в умовах, наближених до реальних. Тестування здійснювалося з урахуванням основних сценаріїв роботи пульта, зокрема передача сигналів, відгук пристрою на дії користувача, робота дисплея та витрати енергії.

Усі випробування проводилися спочатку у звичайному житловому приміщенні середнього розміру – приблизно 20 квадратних метрів. Враховуючи наявність таких перешкод, як стіни, меблі, побутова техніка, умови були досить типовими для використання пульта в реальному середовищі. Крім того, частина перевірок виконувалася просто неба, на відкритому просторі, щоб побачити, як змінюється якість зв'язку на відстані без серйозних завад(див. табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Параметри тестування і умови

Параметри	Значення / опис
Тип приміщення	Житлове, 20 м <sup>2</sup>
Відстань для тестів	Від 1 до 60 метрів
Джерело живлення	Акумулятор 3.7 В та DC DC конвертер 9 В
Перешкоди	Стіни, меблі, Wi-Fi, побутова техніка
Використанні інструменти	Мультиметр, LED-індикація

В ході тестування особлива увага зверталася на поведінку OLED-дисплея. Було важливо перевірити, чи правильно відображаються координати стику, як працює меню, чи немає затримок у відображенні змін при взаємодії з джойстиком. Візуально контролювалося, як швидко змінюється інформація на екрані в залежності від руху стику чи натискання кнопок. Це дозволило зрозуміти, наскільки інтерфейс є зручним і чи підходить він для тривалого використання.

Крім графічного інтерфейсу, тестувалася і сама передача даних через модуль nRF24L01. Було реалізовано просту індикацію на приймачі за допомогою світлодіодів, які вмикалися або вимикалися в залежності від положення стику. Це допомогло визначити, чи дійсно команди передаються правильно, і як швидко відбувається реакція на стороні приймача.

Також перевіряли, як система поводить себе при різних джерелах живлення: як від USB, так і від акумулятора. Це дало змогу оцінити стабільність роботи у автономному режимі. Для вимірювання струму, який споживає пристрій, використовувався звичайний мультиметр. Значення струму фіксувалися як під час активної передачі даних, так і в стані очікування.

Загалом, методика тестування включала низку перевірок, які дозволили зробити висновки не лише про функціональність пульта, а й про те, наскільки він зручний у користуванні та стійкий до типових умов експлуатації.

## 5.2 Результати роботи передавача

У ході практичних випробувань особлива увага приділялася роботі передавальної частини системи, оскільки саме вона відіграє ключову роль у забезпеченні надійної комунікації між пультом дистанційного керування та виконавчим пристроєм. Від якості та стабільності передачі сигналів залежить загальна ефективність і точність керування, що є критично важливим для подібних систем.

Під час роботи пульта у різних режимах було виявлено, що реакція на дії користувача відбувається майже миттєво. Варто зазначити, що незалежно від

напрямку чи інтенсивності руху стика, передавач коректно формував відповідні пакети даних та відправляв їх до приймача без будь-яких затримок або збоїв. Це підтверджує, що модуль nRF24L01, використаний у конструкції пристрою, здатен стабільно функціонувати навіть при частій зміні станів, що особливо важливо при активній взаємодії з інтерфейсом.

Також було відзначено, що при багаторазовому натисканні кнопок на корпусі пульта система демонструвала високий рівень надійності передачі – жодна з команд не загубилася, і всі дії одразу ж викликали відповідну реакцію на стороні приймача. Це свідчить про правильну організацію обміну даними та вдалу реалізацію логіки програмної частини передавача. Додатковим доказом цього стала відсутність потреби в повторному натисканні кнопок – система реагувала з першого разу, що суттєво підвищує зручність користування.

Щодо взаємодії з OLED-дисплеєм, то важливо підкреслити, що екран оперативно оновлював усі показники, пов'язані зі станом стика, а саме координати по осях X та Y. У процесі тестування не спостерігалось затримок чи підвисань у виведенні інформації на екран. Користувач отримував актуальні дані у режимі, максимально наближеному до реального часу, що створювало враження повного контролю над пристроєм.

У більш тривалих сесіях перевірки, які тривали по кілька годин безперервної роботи, не було помічено жодних аномалій у поведінці пульта. Він продовжував стабільно реагувати на рухи стика та натискання кнопок, не втрачаючи зв'язку з приймачем і не демонструючи ознак зниження чутливості або затримок у передачі сигналів. Це особливо важливо для систем, які можуть використовуватись у відповідальних або критичних умовах, де навіть короткочасна втрата керування є недопустимою.

Таким чином, результати тестування передавача показали, що пульт справляється зі своїми основними завданнями на високому рівні. Його робота характеризується швидкою реакцією, стабільною передачею даних та чітким виведенням інформації на дисплей. Усе це підтверджує, що обрані апаратні й програмні рішення були доцільними і повністю виправдали себе в умовах

реального використання.

### 5.3 Результати роботи приймача

Успішне функціонування системи дистанційного керування значною мірою залежить від того, наскільки стабільно і точно працює приймальна сторона. Саме приймач відповідає за інтерпретацію вхідних сигналів, виконання відповідних дій та забезпечення зворотного зв'язку на основі отриманої інформації. Тому під час тестування велика увага приділялась саме спостереженню за тим, як приймач реагує на команди, що надходять від пульта.

У ході випробувань було встановлено, що всі сигнали, які надходили від передавача, приймалися чітко та без помилок. При цьому спостерігалось стабільне й послідовне виконання команд, без втрат чи затримок у обробці. Наприклад, при зміні положення стика на пульті одразу відбувалася відповідна реакція на стороні приймача – вмикалися або вимикалися світлодіоди, що імітували виконавчі елементи. Усі дії виконувалися синхронно з рухами користувача, що створювало відчуття прямого і миттєвого контролю над пристроєм.

Особливо важливою виявилася перевірка механізмів синхронізації між передавачем і приймачем. Навіть у ситуаціях, коли модуль тимчасово втрачав сигнал (наприклад, при переміщенні пульта за межі зони стабільного прийому або у випадку короткочасних радіоперешкод), система не «зависала» і не втрачала орієнтацію в потоці даних. Після відновлення зв'язку приймач одразу повертався до нормального режиму роботи, обробляючи останні актуальні дані (див. табл. 5.2). Це говорить про ефективність вбудованих засобів синхронізації та стійкість системи до типових перешкод, що можуть виникнути у процесі реального використання.

Таблиця 5.2 – Синхронізація і обробка втрат

Тестова ситуація	Результат	Коментар
Втрата сигналу(короткочасна)	Приймач переходить у режим очікування	Повернення до роботи після відновлення зв'язку
Перешкоди радіочастотні	Поодинокі затримки, автоматичне відновлення	Система не “зависає”, зберігає актуальність даних

Ще одним важливим моментом була перевірка на обробку втрат або збоїв у передачі. У кількох контрольованих випадках були створені умови, які імітували раптове припинення передачі даних, наприклад, через відключення живлення передавача або перекриття сигналу. У таких ситуаціях приймач поведився передбачувано: він не намагався виконати неповні чи помилкові команди, а залишався в останньому відомому стані, очікуючи на відновлення стабільного зв'язку. Це дозволяє зробити висновок, що система не тільки правильно обробляє коректні дані, але й здатна грамотно реагувати на форс-мажорні ситуації, не створюючи загрозливих або неконтрольованих дій.

У цілому, результати тестування приймальної частини системи виявилися позитивними. Реакція на вхідні сигнали була чіткою, швидкою та стабільною. Випадків некоректної інтерпретації даних не зафіксовано. Приймач ефективно обробляв пакети команд, а також коректно поведився у випадку тимчасових втрат зв'язку. Це свідчить про надійність і практичну готовність системи до експлуатації в різноманітних умовах, включаючи складні або нестабільні середовища, де можливі короткочасні перебої зв'язку.

#### 5.4 Дальність зв'язку та стабільність

Одним із найважливіших параметрів бездротової системи дистанційного керування є стабільність зв'язку між передавачем та приймачем на різних

відстанях. Для практичної оцінки цього показника було проведено серію вимірювань у різних умовах, які дозволили виявити сильні й слабкі сторони використаного радіомодуля nRF24L01 у межах розробленого пульта.

На першому етапі тестування перевірка дальності зв'язку здійснювалася в приміщенні, де було багато побутових перешкод: стіни з бетону, дерев'яні меблі, побутова техніка та інші типові елементи, що здатні поглинати або відбивати радіосигнал. За таких умов зв'язок залишався стабільним на відстані до приблизно 15 метрів. При цьому не спостерігалось жодних критичних втрат пакетів або затримок у роботі. У межах однієї кімнати та навіть при переміщенні пульта в сусідні приміщення сигнал залишався впевненим, а командами можна було керувати без збоїв (див.табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Дальність зв'язку та стабільність

Умови тестування	Максимальна стабільна відстань, м	Особливості / примітки
В приміщенні	~15	Наявність бетонних стін і меблів
На відкритому просторі	50-60	Пряма видимість, мінімальні перешкоди
В зоні впливу Wi-Fi та інших пристроїв	30-40	Короткочасні зниження якості сигналу

Далі проводилось тестування на відкритому просторі – на вулиці, де відсутні штучні радіоперешкоди. У таких умовах дальність зв'язку істотно зросла. За результатами випробувань стало зрозуміло, що пульт здатен підтримувати стабільний зв'язок із приймачем на відстані до 50–60 метрів, а інколи навіть більше – за умови прямої видимості. При досягненні критичної межі (понад 70 метрів) починали спостерігатися поодинокі затримки у виконанні команд або рідкісні втрати пакету, проте система в більшості випадків

автоматично відновлювала передачу завдяки вбудованим алгоритмам повторної відправки.

Варто зазначити, що на якість зв'язку помітно впливає не лише відстань, але й наявність електромагнітних завад. Під час тестів поблизу працюючих Wi-Fi маршрутизаторів або інших радіопристроїв, що працюють у тому ж частотному діапазоні 2,4 ГГц, іноді відбувалося короткочасне зниження якості зв'язку. Однак модуль nRF24L01 досить стійко переносив подібні умови, і жодного разу не виникало повного розриву зв'язку, якщо пульт залишався в межах допустимої відстані.

Щодо заявлених технічних характеристик модуля nRF24L01, варто відзначити, що виробники вказують максимальну дальність до 100 метрів у відкритому середовищі при використанні модулів із зовнішніми антенами. В нашому випадку застосовувався модуль зі стандартною друкованою антеною, тому досягнуті результати (приблизно 50–60 метрів на вулиці) є цілком очікуваними й відповідають типовим практичним показникам, описаним у технічній документації.

Таким чином, можна зробити висновок, що система показала себе з позитивного боку як у приміщенні, так і на відкритому просторі. Зв'язок був стабільним, дальність передачі задовольнила вимоги, а вплив зовнішніх чинників не призводив до серйозних порушень роботи. Все це свідчить про те, що використання nRF24L01 у даній системі є виправданим з точки зору балансу між дальністю, надійністю та енергоспоживанням.

### 5.5 Вимірювання енергоспоживання

Одним із важливих критеріїв оцінки роботи пульта дистанційного керування є його енергоспоживання, особливо враховуючи, що пристрій призначений для автономної роботи. Живлення системи здійснюється через DC-DC конвертер, що підвищує напругу від акумулятора 3.7 В до 9 В, необхідних для стабільної роботи компонентів, включаючи OLED-дисплей, джойстик і радіомодуль nRF24L01 з зовнішньою антеною.

Для визначення фактичного струму споживання проводилися вимірювання мультиметром у різних режимах роботи. У стані активної передачі, коли модуль nRF24L01 із зовнішньою антеною безперервно передає пакети даних, джойстик активно використовується, а OLED-дисплей оновлюється з максимальною частотою, струм споживання сягав близько 75–80 мА. Такий підвищений показник пояснюється додатковими енергетичними витратами радіомодуля з потужнішою антеною, а також споживанням OLED-дисплеєм під час яскравого і частого оновлення зображення (див. табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Результати енергоспоживання

Режим роботи	Струм споживання, мА	Орієнтований час роботи, годин
Активна передача даних	75-80	24-26
Режим очікування	50-55	30-32

У режимі очікування, коли передача даних відсутня або відбувається дуже рідко, а дисплей відображає статичне меню, споживання знижувалося до 50–55 мА. Цей рівень залишається відносно стабільним завдяки DC-DC конвертеру, що підтримує стабільне живлення для всіх компонентів.

Враховуючи ємність використовуваного літій-іонного акумулятора LG на 2000 мА·год, можна приблизно оцінити час автономної роботи пульта. При середньому струмі споживання близько 60–65 мА пристрій може безперервно працювати приблизно 30–32 години. У більш інтенсивних умовах використання, з постійною активною передачею і частим оновленням OLED-дисплея, автономність зменшується до 24–26 годин.

Такі показники є цілком прийнятними для портативного пульта дистанційного керування, який поєднує у собі функціональність OLED-інтерфейсу та бездротової комунікації з якісною антеною. В подальшому є можливість покращити енергоефективність за рахунок оптимізації програмного

забезпечення, зокрема використання режимів зниженого енергоспоживання OLED-дисплея та регулювання потужності передавача.

Отже, вимірювання енергоспоживання підтвердили, що конструкція пульта є збалансованою і дозволяє забезпечити достатній час автономної роботи для комфортного використання в реальних умовах.

### 5.6 Проблеми що виникали та способи їх усунення

На початковому етапі розробки пульта дистанційного керування першим використаним бездротовим модулем був RF433 із бібліотекою RadioHead. Однак цей модуль часто заважав коректній ініціалізації OLED-дисплея, що призводило до проблем із запуском інтерфейсу та ускладнювало подальший розвиток системи. Через це було прийнято рішення перейти на модуль nRF24L01 із більш надійною підтримкою та стабільною роботою.

При переході на nRF24L01 вдалося стабільно ініціалізувати OLED-дисплей і організувати надійний бездротовий зв'язок. Проте під час тестування системи спостерігалися поодинокі втрати пакетів і затримки передачі, особливо в умовах радіоперешкод або на великих відстанях між передавачем і приймачем. Для підвищення надійності були впроваджені механізми автоматичного повтору передачі та вибір менш завантажених каналів.

Загалом, завдяки цим заходам, робота пульта стала стабільною, а основні функції працюють без значних збоїв навіть у складних радіочастотних умовах.

### 5.7 Висновки за результатами тестування

В результаті проведених досліджень та тестувань було успішно реалізовано ключові функції пульта дистанційного керування: стабільний прийом і передачу координат джойстика та стану кнопок, інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс на OLED-дисплеї, а також надійну бездротову комунікацію за допомогою модуля nRF24L01. Пульт продемонстрував достатню автономність завдяки використанню ефективної системи живлення з літій-

іонним акумулятором і DC-DC конвертером (див. табл. 5.5).

Таблиця 5.5 – Функціональні результати тестування

Функція	Результат тестування	Примітки
Передача координат стика	Відбувається без затримок	Стабільна робота навіть при частих змінах
Робота OLED-дисплея	Швидке оновлення даних	Відсутність підвисань
Обробка кнопок	Всі натискання розпізнаються	Жодних втрат команд

Система у повному обсязі відповідає поставленим технічним вимогам. Передача даних відбувається стабільно навіть на середніх і великих відстанях, а робота інтерфейсу залишалася чуйною та без помітних затримок. Усі основні функції працювали без збоїв під час тривалих випробувань.

Разом з тим, проведене тестування виявило потенціал для подальшого вдосконалення. Зокрема, можливе впровадження зворотного каналу для виведення інформації від приймача на OLED-дисплей пульта, що підвищить зручність контролю. Також є сенс оптимізувати енергоспоживання шляхом впровадження більш глибоких режимів енергозбереження, а також розширити функціонал меню для більш гнучкого керування пристроєм.

Таким чином, розроблена система є ефективним та надійним рішенням для дистанційного керування, яке має гарні перспективи для подальшого розвитку і адаптації під різноманітні застосування.

## 6 АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ

Для забезпечення якісної роботи пульта дистанційного керування та керованого ним виконавчого пристрою важливим є аналіз стійкості системи автоматичного регулювання. В даному випадку керування положенням виконавчого механізму здійснюється за допомогою пропорційного регулятора (П-регулятора), який реалізований у дискретній формі.

### 6.1 Математична модель П-регулятора

Розглянемо дискретну модель пропорційного регулятора, що описується рівнянням:

$$y(k + 1) = y(k) + K_p \cdot [u(k) - y(k)],$$

де  $y(k)$  – поточне положення виконавчого механізму на кроці  $k$   
 $u(k)$  – значення координати, отримане від пульта (задане положення),  
 $K_p$  – коефіцієнт пропорційності, що визначає інтенсивність корекції.

Розкривши дужки, маємо:

$$y(k + 1) = (1 - K_p) \cdot y(k) + K_p \cdot u(k)$$

### 6.2 Передавальна функція в області z-перетворення

Для аналізу динамічних властивостей системи застосовуємо дискретне z-перетворення, припускаючи нульові початкові умови:

$$zY(z) = (1 - K_p)Y(z) + K_p U(z),$$

де  $Y(z)$  та  $U(z)$  –  $z$ -образи відповідно вихідного положення виконавчого механізму та вхідного сигналу пульта.

Звідси передавальна функція системи:

$$W(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{K_p}{z - (1 - K_p)}$$

Полюси системи знаходяться у точці  $z = (1 - K_p)$ , що визначає її стабільність.

### 6.3 Умови стійкості системи

Система автоматичного регулювання вважається стійкою, якщо всі її полюси розташовані всередині одиничного кола в комплексній площині  $z$ :

$$|z| < 1$$

Для нашої системи це означає:

$$|1 - K_p| < 1$$

Відповідно отримуємо:

$$0 < K_p < 2$$

Отже, коефіцієнт пропорційності  $K_p$ , що визначає реакцію виконавчого механізму на сигнали пульта, має знаходитись у межах від 0 до 2 для забезпечення стабільної роботи системи дистанційного керування.

#### 6.4 Візуалізація діапазону стабільності

Для наочного представлення області стійкості системи на рисунку 6.1 наведено графік залежності модуля полюса  $|z| = |1 - K_p|$  від значення  $K_p$ . Область, де  $|z| < 1$ , відповідає стабільній роботі регулятора, що гарантує коректне та безпечне керування виконавчим механізмом за допомогою пульта.

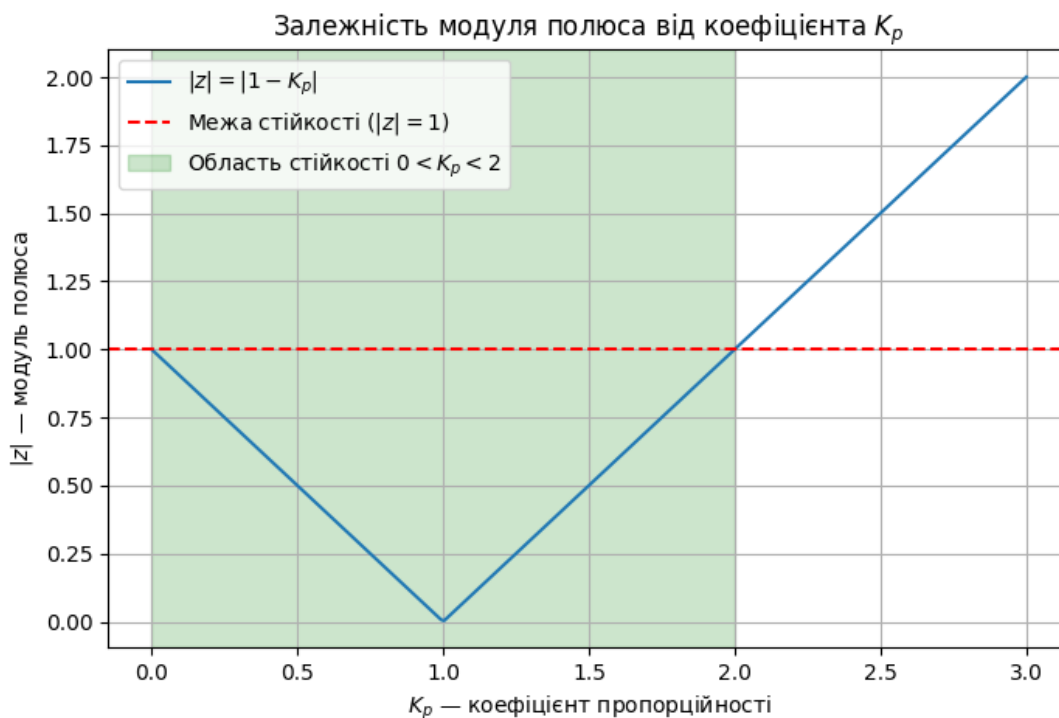


Рисунок 6.1 – Графік залежності модуля полюса  $|z|$  від коефіцієнта пропорційності  $K_p$

Таким чином, проведений аналіз стійкості підтверджує важливість правильного вибору параметрів П-регулятора у системі дистанційного керування для забезпечення ефективної та стабільної роботи виконавчого пристрою.

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто основної мети – розроблено функціональний пульт дистанційного керування роботом-промоутером, що забезпечує двосторонній бездротовий зв'язок між оператором і виконавчим пристроєм. У межах проєкту проведено аналіз предметної області, розглянуто існуючі рішення та визначено переваги обраної архітектури.

Пульт побудовано на основі мікроконтролера Arduino Uno у ролі передавача та Arduino Nano як приймача. Для реалізації зв'язку застосовано енергоефективний радіомодуль nRF24L01, що забезпечив стабільну передачу даних на частоті 2,4 ГГц. Взаємодія користувача з пультом здійснюється за допомогою аналогового джойстика та кнопок, а зворотній зв'язок реалізовано через OLED-дисплей із графічним інтерфейсом. Було розроблено багаторівневе меню, яке дозволяє виводити координати стика, інформацію про версію програмного забезпечення, а також виконувати калібрування введення.

Програмне забезпечення побудоване за модульним принципом, що дозволяє легко адаптувати систему до нових умов та розширювати її функціонал. Приймач, у свою чергу, реагує на отримані команди шляхом активації відповідних світлодіодів, що підтверджує коректну обробку сигналів.

Під час тестування було підтверджено працездатність системи в лабораторних умовах, її стабільність, точність керування та автономність при живленні від акумулятора. Крім того, у межах роботи було розглянуто стійкість системи автоматичного регулювання на основі П-регулятора, що створює підґрунтя для подальшого вдосконалення системи керування.

Загалом, запропоноване рішення поєднує зручність, функціональність і надійність, що робить його придатним для використання в освітніх, демонстраційних і практичних застосуваннях, а також створює потенціал для подальшого розвитку проєкту.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. - 29 с
2. Євсєєв В.В. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi и мови Python 3.6) // Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В. Підручник. – Харків : 2020. С. 257.
3. Nevliudov, I., & et al. (2022). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In 2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), IEEE, 61-64.
4. Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for Cyber-Physical Production Systems Functioning Synthesis. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 8(10), 7465-7473
5. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації. Збірник задач: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, Г.В. Пономарьова, А.О. Функендорф. Кривий Ріг: КК НАУ. 2018. – 332 с.
6. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навч.посіб. для студентів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. - Харків: Панов А.М., 2020. – 240 с.
7. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Максимова С.С. ВЕАМ робототехніка: Навчальний посібник. – Oktan Print – Prague.: 2024.- 276 с.
8. Невлюдов І.Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: підручник. Харків: ФОП Панов А.М., 2021. – 604 с.
9. Основи наукових досліджень : підручник / І. Ш. Невлюдов, Ю. М. Александров, А. О. Андрусевич, О. О. Чала ; М-во освіти і науки України, Харків.

нац. ун-т радіоелектроніки. – Prague : OKTAN PRINT, 2024. – 468 с.

10. Технічне та програмне забезпечення розробки малогабаритного мобільного робота: монографія / І.Ш. Невлюдов, В.В. Євсєєв, Д.В. Гурін. Кривий Ріг: Криворізький фаховий коледж Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут», 2025. – 355с. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-617-8332-74-7>

11. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Безпека праці в індустрії ІТ-технологій» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [<http://catalogue.nure.ua/knmz>] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 122 с.