

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Кафедра обчислювальної техніки

КОМПЛЕКСНА БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Кіберфізичний комплекс для автономної навігації з використанням маркерів

Частина 1. Апаратне забезпечення»

08-54.КБКР.041.00.000 ПЗ

Виконав: студент 4 курсу, групи 2СП-216

спеціальності 123 — «Комп'ютерна інженерія»

освітня програма — «Системне програмування»

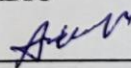


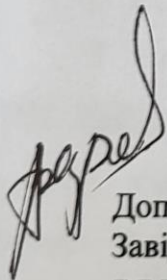
Черневський Н. О.

Керівник к.т.н., доц. каф. ОТ

Богомолів С. В. 

Рецензент к.т.н., доц. каф. МБІС

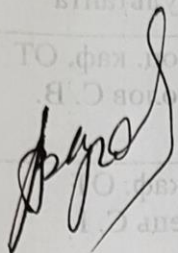
Шиян А. А. 


Допущено до захисту
Завідувач кафедри ОТ
д.т.н., проф. Азаров О. Д.

«09» 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ — 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Кафедра обчислювальної техніки
Освітньо—кваліфікаційний рівень бакалавр
Галузь знань — 12 Інформаційні технології
Спеціальність — 123 Комп'ютерна інженерія
Освітня програма — Комп'ютерна інженерія



ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ОТ

д.т.н.проф. _____ Азаров О. Д.

«21» березня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КОМПЛЕКСНУ БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

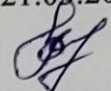
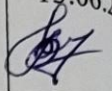
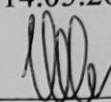
Черневському Назару Олександровичу

- 1 Тема роботи: Кіберфізичний комплекс для автономної навігації з використанням маркерів. Частина 1. Апаратне забезпечення, керівник роботи Богомолів Сергій Віталійович, к.т.н., доцент кафедри ОТ, затверджено наказом вищого навчального закладу від «20» березня 2025 року №97.
- 2 Строк подання студентом роботи 13.05.2025
- 3 Вихідні дані до роботи: технічний опис платформ Arduino Uno, LoLin D32, ESP32-CAM. Технічна документація на електронні компоненти.
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки: вступ; аналіз предметної області та технологій; вибір елементної бази та розробка кіберфізичної системи; компонування елементів кіберфізичної системи; тестування та модифікація системи; висновки.
- 5 Перелік графічного матеріалу: структурна схема, схема підключення підсистеми звукової та світлової індикації.
Перелік ілюстративного матеріалу: ілюстрація руху робота, розроблена

система для світлової та звукової індикації пристрою.

6 Консультанти розділів роботи наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 — Консультанти роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-3	к.т.н., доц. каф. ОТ Богомолів С. В.	21.03.2025 	13.06.2025 
Нормоконтроль	ас. каф. ОТ Швець С. І.	14.05.2025 	30.05.2025

7. Дата видачі завдання 21.03.2025 р.

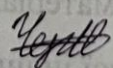
8. Календарний план приведений в таблиці 2.

Таблиця 2 — Календарний план

№ з/п	Назва етапів комплексної бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Підпис
1	Постановка задачі роботи	21.03.25	<i>вик.</i>
2	Аналіз предметної області та технологій	21.03.2025 — 30.03.25	<i>вик.</i>
3	Вибір елементної бази та розробка кіберфізичної системи	21.03.25 — 30.03.25	<i>вик.</i>
3	Компонування елементів кіберфізичної системи	31.03.25 — 13.04.25	<i>вик.</i>
5	Тестування та модифікація системи	14.04.25 — 27.04.25	<i>вик.</i>
6	Оформлення пояснювальної записки	28.04.25 — 11.05.25	<i>вик.</i>
7	Перевірка якості виконання комплексної бакалаврської кваліфікаційної роботи та усунення недоліків	13.05.25	<i>вик.</i>

Студент

Керівник роботи

 Назар ЧЕРНЕВСЬКИЙ

к.т.н., доц. Сергій БОГОМОЛІВ

АНОТАЦІЯ

УДК 629.05

Черневський Н.О. Кіберфізичний комплекс для автономної навігації з використанням маркерів. Частина 1. Апаратне забезпечення. Комплексна Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія», освітня програма «Системне програмування». Вінниця: ВНТУ, 2025. 81 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 26 назв; рис.: 42; табл. 3.

У комплексній бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблено апаратне забезпечення автономної кіберфізичної системи з трековою навігацією. Для підбора оптимальної елементної бази було проаналізовано сучасні технології для розробки роботизованих комплексів та досліджено існуючі аналоги. Описано характеристики, можливості та способи підключення обраних апаратних елементів. Створено схему підключення всіх компонентів. Скомпоновано описані апаратні рішення в кіберфізичну систему, перевірено її працезданість та описано можливі варіанти вдосконалення.

Ключові слова: Arduino Uno, ESP32, LoLin D32, ESP32-CAM, маркери, автономна навігація, мультимедія, мікроконтролери, адресні світлодіоди.

ABSTRACT

УДК 629.05

Chernevskyi N.O. Cyber-physical complex for autonomous navigation using markers. Part 1. Hardware. Comprehensive bachelor's qualification work in specialty 123 “Computer Engineering”, educational program “System Programming”. Vinnytsia: VNTU, 2025. 81 pages.

In Ukrainian. Bibliography: 26 titles; figures: 42; tables: 3.

In the comprehensive bachelor's qualification work, the hardware for an autonomous cyber-physical system with track-based navigation was developed. To select the optimal component base, modern technologies for the development of robotic complexes were analyzed and existing analogs were studied. The characteristics, capabilities, and connection methods of the selected hardware components were described. A wiring diagram of all components was created. The described hardware solutions were integrated into a cyber-physical system, its operability was tested, and possible improvement options were outlined.

Keywords: Arduino Uno, ESP32, LoLin D32, ESP32-CAM, markers, autonomous navigation, multimedia, microcontrollers, addressable LEDs.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕХНОЛОГІЙ.....	6
1.1. Кіберфізичні системи: поняття та сфери застосування	6
1.2 Навігація на основі маркерів: оптичні, магнітні рішення	8
1.3 Платформи для розробки кіберфізичних систем.....	13
1.4 Аналіз рішень з мультимедійним інтерфейсом у мобільних роботах	16
1.5 Приклади реалізованих систем автономного руху	18
2 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА РОЗРОБКА КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	21
2.1 Мікропроцесорна платформа Arduino Uno	21
2.2 Функції ESP32-CAM для віддаленої взаємодії.....	24
2.3 Застосування LOLIN D32 для обробки аудіо та індикації	27
2.4 Огляд додаткових модулів.....	29
2.5 Структурна та принципова електрична схеми.....	35
2.6 Система живлення	37
3 КОМПОНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ	40
3.1. Збірка компонентів системи	40
3.2 Підключення Arduino Uno до виконавчих механізмів.....	48
3.2.1 Опис плати розширення.....	49
3.2.2 Підключення виконавчих елементів	50
3.3 Реалізація звукової та світлової індикації за допомогою LOLIN D32	52
3.4 Організація зв'язку між Arduino Uno, ESP32-CAM та LOLIN D32	54
4 ТЕСТУВАННЯ ТА МОДИФІКАЦІЯ СИСТЕМИ.....	57
4.1 Методика тестування системи.....	57
4.2 Тестування кіберфізичної системи	58
4.2.1 Тестування руху	58
4.2.2 Тестування світлової та звукової індикації	59
4.3 Виявлення недоліків і вдосконалення зібраного комплексу.....	61
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64

ДОДАТОК А Технічне завдання	67
ДОДАТОК Б Протокол перевірки навчальної (кваліфікаційної) роботи	71
ДОДАТОК В Графічна частина.....	72
ДОДАТОК Г Ілюстративна частина.....	75
ДОДАТОК Д Документація на модуль MAX98357	77

ВСТУП

Актуальність дослідження полягає в тому, що галузь кіберфізичних систем активно розвивається, і основним елементом цього процесу є можливості автономності та навігації. Використання маркерів для орієнтації роботів є перспективним підходом, оскільки дозволяє забезпечити точність і стабільність роботи в умовах обмеженої інфраструктури. Це важливо для закритих просторів, таких як склади, виробничі цехи або лабораторії, де традиційні GPS рішення неефективні. Апаратні компоненти, такі як Arduino, ESP32 відкривають можливість створення бюджетних, але функціональних систем. Вони поєднують обчислювальну потужність, можливість підключення різних сенсорів та простоту програмування.

Одна з основних проблем у розробці автономних навігаційних систем це баланс між точністю, вартістю та складністю реалізації. Використання маркерів дозволяє спростити алгоритми обробки даних, оскільки вони слугують чіткими орієнтирами. Правильний вибір апаратної бази, зокрема мікроконтролерів із достатньою продуктивністю, дозволяє уникнути затримок у обчисленнях і забезпечити плавний рух робота. Доступність цих компонентів робить технології автономної навігації відкритими для широкого кола розробників, сприяючи їхньому подальшому вдосконаленню.

У багатьох сучасних навігаційних системах використовують камери, але це не завжди виправдано. Камера це складний компонент, вона коштує дорого, потребує потужного процесора для обробки зображення, а ще вимагає точного налаштування та дорого програмного забезпечення. Працює вона добре тільки за нормального освітлення. У змінних умовах — наприклад, при тінях, сонці або недостатньому світлі якість зображення падає, і система може дати збій. Це робить камери незручними в багатьох реальних ситуаціях.

Більш практичним варіантом є інфрачервоні датчики. Вони прості в підключенні, працюють швидко, не залежать від звичайного освітлення і добре бачать різницю між поверхнями, наприклад, чорною смугою і білим фоном. Їхня

точність достатня для трекової навігації, а вартість мінімальна. Для невеликих автономних роботизованих комплексів це одне з найоптимальніших рішень.

Дані з сенсорів можна обробляти на доступних мікроконтролерах — Arduino або ESP32. Вони легко програмуються, коштують недорого і справляються з такими задачами без потреби в складному обладнанні.

Об’єктом дослідження є кіберфізичні системи, що реалізують автономну навігацію з використанням трекового слідування.

Предметом дослідження є апаратне забезпечення мобільного роботизованого комплексу, побудованого на базі мікроконтролерів ESP32, Arduino UNO, аудіомодуля MAX98357 та світлодіодних модулів WS2812B.

Метою роботи є створення функціональної апаратної конфігурації автономного роботизованого комплексу з підтримкою навігації за маркерами. Для її досягнення необхідно виконати такі **завдання**:

- підібрати апаратні компоненти;
- розробити схему підключення та забезпечити взаємодію між модулями;
- зібрати апаратну частину системи на основі обраних компонентів;
- провести тестування та виконати налагодження системи

Наукова новизна даної роботи полягає у побудові автономної навігаційної системи на основі недорогих і загальнодоступних апаратних компонентів з використанням інфрачервоного маркерного орієнтування.

Практична значущість полягає в застосуванні в навчальних курсах робототехніки та створенні прототипів для автономних транспортних засобів.

Публікації за темою роботи: ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МАРКЕРІВ У СИСТЕМАХ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ / Н. О. Черневський, С. В. Богомолів, В. А. Шатайло // Матеріали LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету інформаційних технологій та комп’ютерної інженерії. Вінниця 2025 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2025/paper/view/23995>

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

1.1. Кіберфізичні системи: поняття та сфери застосування

Кіберфізичні системи — це системи, в яких електроніка, програмне забезпечення та фізичні пристрої працюють разом, реагують на навколишнє середовище і взаємодіють між собою [1]. На відміну від традиційних автоматизованих систем, кіберфізичні системи не лише зчитують дані з навколишнього середовища через сенсори, але й аналізують їх у реальному часі, приймаючи рішення, які безпосередньо впливають на фізичні процеси через актуатори. Наприклад, система керування «розумним» будинком регулює температуру, аналізуючи дані про вологість і рух мешканців.

Основу цих систем складає гібридність, яка проявляється у поєднанні двох середовищ: фізичного (механічні, електричні, термодинамічні процеси) та кібернетичного (алгоритми, мережі, штучний інтелект).

Затримка в передачі даних між сенсором і контролером може призвести до критичних помилок, особливо в системах з високими вимогами до безпеки, таких як медичні імпланти або авіаційні автопілоти. Саме ця характеристика відрізняє кіберфізичні системи від більшості IoT-рішень, які часто працюють у відкритих циклах без реального впливу на фізичні процеси.

Кіберфізичні системи знаходять застосування в різноманітних галузях, покращуючи традиційні процеси завдяки інтеграції цифрових та фізичних компонентів. Їхня здатність аналізувати дані в реальному часі та адаптуватися до змін робить їх ключовим інструментом у сучасній інженерії та управлінні.

У сфері енергетики кіберфізичні системи лежать в основі розумних мереж (smart grids), які оптимізують генерацію, розподіл і споживання електроенергії [2]. Наприклад, системи автоматично балансують навантаження, враховуючи дані з датчиків споживання, прогнози погоди та стан обладнання. У випадку аварії системи перенаправляють потік енергії, запобігаючи масовим відключенням. Також вони інтегрують відновлювані джерела (сонячні панелі,

вітрові турбіни), керуючи їхньою роботою в залежності від попиту та погодних умов.

Кіберфізичні системи революціонізують медицину завдяки кардіостимуляторам або інсуліновим помпи, які аналізують біометричні дані пацієнта (наприклад, рівень глюкози в крові) та автоматично коректують лікування. У хірургії роботизовані системи, керовані алгоритмами ШІ, виконують точні маніпуляції, зменшуючи ризик помилок. Телемедицина використовує ці системи для віддаленого моніторингу стану хворих, де дані з носимих датчиків передаються лікарю через хмарні платформи.

Автономні транспортні засоби — найяскравіший приклад кіберфізичних систем у цій галузі. Вони поєднують дані з лідарів, камер та GPS для навігації, уникання перешкод і планування маршрутів. У міській інфраструктурі вони керують світлофорами, адаптуючи їхній режим до інтенсивності трафіку, що знижує затори. У логістиці “розумні” склади використовують RFID-мітки та роботизовані візки для автоматизації сортування та доставки вантажів.

У виробництві кіберфізичні системи забезпечують перехід до гнучких автоматизованих ліній. Наприклад, система може переналаштуватися з випуску однієї моделі смартфона на іншу, аналізуючи дані з RFID-міток на компонентах. Датчики вібрації та температури на обладнанні виявляють ознаки зносу, запобігаючи поломкам. Це дозволяє реалізувати концепцію предиктивного обслуговування, де ремонт планується до виникнення аварії.

Кіберфізичні системи покращують агросектор завдяки своїй точності. Безпілотники з мультиспектральними камерами аналізують стан посівів, виявляючи нестачу вологи або хвороби. На основі цих даних автоматизовані системи поливу або добрива подають ресурси точечно, зменшуючи витрати. У тваринництві датчики моніторять здоров'я тварин, а алгоритми прогнозують оптимальний час для годівлі або лікування.

Кіберфізичні системи інтегрують різні інфраструктурні системи міста в єдину мережу. Наприклад, дані з датчиків забруднення повітря, трафіку та енергоспоживання аналізуються для керування громадським транспортом,

системами освітлення або евакуації під час надзвичайних ситуацій. "Розумні" сміттєві баки передають інформацію про заповненість, оптимізуючи маршрути сміттєвозів.

Таким чином, кіберфізичні системи це не просто сукупність технологій, а нова парадигма інженерії, де фізичні об'єкти стають частиною динамічної цифрової екосистеми. Їхня роль полягає у трансформації пасивних даних у дії, що робить їх ключовим елементом майбутніх інновацій, від автономного транспорту до персоналізованої медицини.

1.2 Навігація на основі маркерів: оптичні, магнітні рішення

Маркерна навігація є методом орієнтації роботизованих комплексів та автономних систем у просторі, що базується на використанні штучних орієнтирів — маркерів [3]. Ці спеціально розміщені елементи слугують точками відліку, за допомогою яких система визначає своє положення з високою точністю. Відмінність цього підходу полягає у його універсальності — маркери можуть бути як пасивними (фізичними об'єктами), так і активними (генерованими сигналами).

Основні сфери застосування маркерної навігації охоплюють різні галузі промисловості та технологій. У логістиці такі системи забезпечують точне переміщення вантажних платформ та складських роботів. Промисловість використовує маркерні технології для автоматизації виробничих ліній, де важлива повторюваність операцій. Медичні застосування включають навігацію хірургічних роботів та діагностичного обладнання, де потрібна особливо висока точність позиціонування.

Порівняно з іншими методами навігації, маркерні системи пропонують низку переваг. Вони забезпечують більш стабільну роботу в умовах обмеженого простору, де традиційні GPS-технології неефективні. Їх точність значно вища, ніж у систем, що базуються на датчиках інерції або візуальній одометрії. Важливою перевагою є можливість адаптації до конкретних умов експлуатації шляхом зміни конфігурації маркерів без дорогих модифікацій самої навігаційної системи.

Контрастні стрічки залишаються одним із найпростіших та водночас найефективніших методів організації навігації для роботизованих систем.

Вони використовуються для створення траєкторії, по якій робот може орієнтуватися за допомогою сенсорів, що реагують на зміну кольору поверхні (рисунок 1.1). Найчастіше траєкторія представлена у вигляді чорної лінії на світлому фоні, оскільки саме така комбінація забезпечує найвищу контрастність і, відповідно, стабільне зчитування сигналів сенсорами. Основним параметром, що визначає ефективність такого підходу, є коефіцієнт відбиття світла різними поверхнями. Чорні поверхні майже не відбивають світло, тоді як білі або світлі відображають його. Ця різниця дозволяє інфрачервоним або оптичним сенсорам легко виявляти край між кольорами, швидко реагуючи на зміну покриття.

Такі стрічки зручні у використанні не лише завдяки високій точності розпізнавання, але й через їхню простоту у виготовленні та застосуванні. Для створення маршруту достатньо наклеїти чорну ізоляційну стрічку на білу або світлу поверхню. Це не вимагає спеціалізованого обладнання або дорогих матеріалів. Подібні рішення активно використовуються у навчальних робототехнічних проектах, дослідженнях та демонстраційних моделях, оскільки дозволяють зосередитися на розробці алгоритмів керування, а не на складній навігаційній інфраструктурі [4].

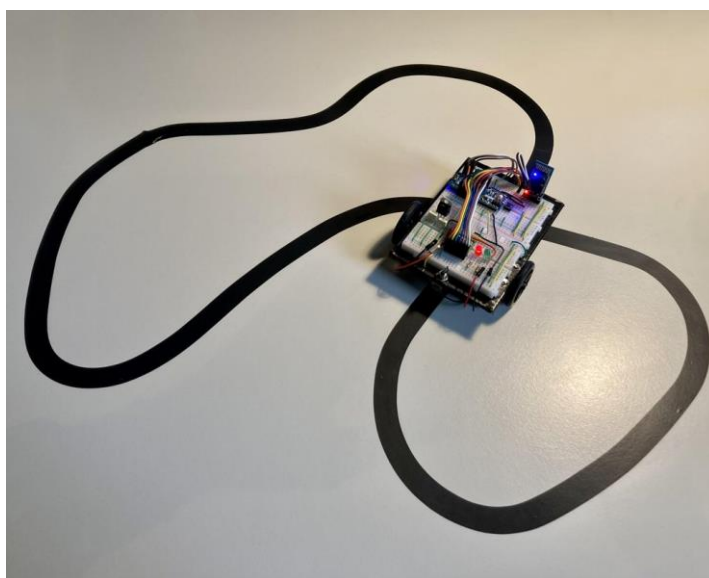


Рисунок 1.1 — Маршрут з контрастною стрічкою для роботизованої навігації

Інфрачервоні датчики лінії використовують фізичне явище відбиття світла для того, щоб розпізнавати зміну контрасту на поверхні, по якій рухається робот [5]. Їх принцип дії ґрунтується на тому, що різні поверхні мають різну здатність відбивати інфрачервоне випромінювання. Світлі ділянки, як правило, добре відбивають інфрачервоне світло, а темні — майже повністю його поглинають. Саме на цьому контрасті й базується робота сенсорів: вони бачать межу між світлим фоном і темною лінією не у видимому спектрі, а в інфрачервоному, що значно зменшує вплив зовнішнього освітлення.

Кожен датчик складається з двох основних компонентів: інфрачервоного світлодіода, що випромінює невидиме для ока світло, та фотоприймача, який фіксує рівень відбитого сигналу (рисунк 1.2). Якщо світло повертається до фотоприймача — значить, під ним світла поверхня. Якщо світло не повертається — під ним темна. Саме цей підхід дозволяє чітко виявляти наявність або відсутність лінії під датчиком. Для більш точного позиціонування одного такого сенсора недостатньо. Найчастіше використовують набори з трьох або п'яти сенсорів, розташованих поруч у ряд. Завдяки такому підходу система отримує більше інформації про положення лінії та її ширину. Якщо, наприклад, сигнал надходить лише з центрального сенсора, значить, робот рухається точно по лінії. Якщо ж активуються крайні — система розуміє, що потрібно скоригувати траєкторію.

Перевага таких датчиків полягає у можливості апаратної оптимізації сигналу. Рівень відбитого сигналу можна попередньо обробити ще до потрапляння на вхід мікроконтролера за допомогою простих схем на компараторах. Обробка сигналу відбувається на дуже базовому рівні: кожен сенсор видає логічний сигнал — "0" або "1", залежно від того, чи виявлено під ним темну лінію, чи світлий фон. Це дозволяє мікроконтролеру, навіть з мінімальними ресурсами, швидко інтерпретувати інформацію й реагувати на зміну положення лінії. Таке спрощене рішення зменшує навантаження на основну програмну частину, вивільняючи ресурси контролера для інших задач.

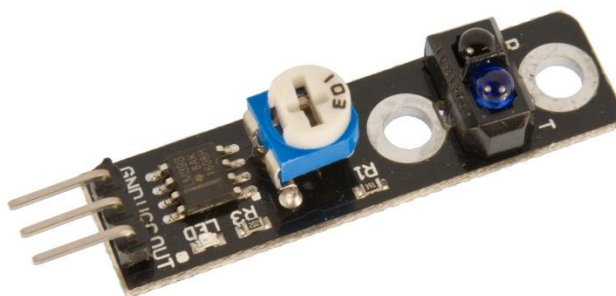


Рисунок 1.2 — Інфрачервоний датчик лінії

Кодові маркери типу ArUco представляють собою двовимірні шаблони, що складаються з чорно білої графічної структури квадратної форми, які містять у собі як просторову, так і ідентифікаційну інформацію [6]. Їх основною перевагою є здатність одночасно виконувати дві важливі функції: по-перше, маркер дозволяє точно визначити положення у просторі відносно камери (тобто координати та орієнтацію), а по-друге — містить у собі закодований унікальний ідентифікатор, що дає змогу відрізняти один маркер від іншого. Це робить їх корисним інструментом для задач комп'ютерного зору, навігації, відстеження руху та побудови систем доповненої реальності.

Візуально ArUco-маркер складається з білого фону та чорної рамки з квадратів, які формують так звану зону синхронізації. Внутрішня частина маркера поділена на сітку (наприклад, 4×4 або 5×5 клітин), у якій розташований бітовий код. Цей код є унікальним числовим значенням, яке система розпізнає після захоплення зображення з камери. Наявність контрольних шаблонів на рамці дозволяє алгоритмам точно локалізувати межі маркера навіть у разі його часткової деформації або зйомки під кутом, а також забезпечує масштабну інваріантність та стійкість до змін освітлення.

ArUco-маркери можуть бути організовані в словники, де кожному маркеру присвоюється унікальний код, що зменшує ймовірність помилкового розпізнавання. У реальних застосуваннях камери з високою або середньою

роздільною здатністю в реальному часі виявляють усі присутні в кадрі маркери, і програмне забезпечення одразу отримує як їх ідентифікатори, так і положення у просторі у вигляді векторів положення та матриць обертання. Це дозволяє точно оцінити відстань до маркера, його нахил і орієнтацію щодо системи координат камери. На рисунку 1.2 представлений приклад типового ArUco-маркера, який демонструє стандартну структуру, що забезпечує як стабільне виявлення, так і точне декодування закладеної в ньому інформації.

На рисунку 1.2 показано приклад застосування ArUco-маркерів для просторового позиціонування камери. Система використовує кілька маркерів для визначення координат і орієнтації камери в системі координат сцени. Цей підхід дозволяє об'єднувати дані з кількох маркерів, підвищуючи точність орієнтації та стійкість до втрати окремих міток у полі зору.

RGB-камери з роздільною здатністю від 1 до 5 Мп дозволяють реалізувати складніші алгоритми розпізнавання. Time-of-Flight (ToF) камери особливо ефективні для визначення відстані до маркерів з точністю до 1 см на відстанях до 5 м. Для роботи в умовах недостатнього освітлення, часто використовують інфрачервоні світлодіоди з довжиною хвилі 850 нм, які не видно людському оку, але чутливі для більшості сенсорів. Точність позиціонування в оптичних системах залежить від трьох основних факторів: роздільної здатності сенсора, якості контрасту маркера та стабільності освітлення. Сучасні системи досягають точності від 0,1 до 2 мм при роботі з близько розташованими маркерами. Для довгих дистанцій точність зазвичай знижується до 5 см.

Магнітні маркери представляють собою спеціально організовані магнітні структури, які формують передбачуване поле для навігації роботів [7]. Вони поділяються на два основних типи: пасивні (постійні магніти) та активні (електромагніти). Пасивні маркери зазвичай виготовляються з неодимових сплавів і вбудовуються в підлогу або стіни, тоді як активні генерують змінне магнітне поле за допомогою котушок. Для детектування магнітних маркерів використовуються спеціалізовані датчики, які базуються на ефекті Холла — явищі виникнення поперечної різниці потенціалів у провіднику з струмом під дією магнітного поля.

Основна відмінність магнітних систем від оптичних полягає в принципі дії та умовах експлуатації. Магнітні маркери не залежать від освітлення і можуть працювати у повній темряві або в умовах сильного задимлення. Вони не чутливі до забруднення поверхні і зберігають ефективність навіть при частковому перекритті. Однак магнітні системи мають обмежений діапазон дії (зазвичай до 30 см) і можуть бути чутливими до сторонніх магнітних полів, що вимагає додаткових заходів захисту.

Оптичні системи, навпаки, пропонують більшу дальність дії і можливість передачі додаткової інформації через кодові маркери. Проте вони сильно залежать від умов освітлення і вимагають чистої поверхні маркерів. У промислових умовах часто використовують гібридні рішення, де магнітні маркери забезпечують базове позиціонування, а оптичні — точне вирівнювання.

1.3 Платформи для розробки кіберфізичних систем

Робототехнічні системи потребують гнучких та ефективних апаратних платформ, здатних забезпечити стабільне управління, обробку даних та взаємодію з різноманітними сенсорами та виконавчими механізмами. Найпоширенішими платформами для побудови автономних роботів є мікроконтролери Arduino, ESP32 та спеціалізовані модулі на кшталт ESP32-CAM.

Arduino Uno, заснована на мікроконтролері ATmega328P, є однією з найпопулярніших платформ для розробки робототехнічних систем, особливо на початковому та середньому рівнях складності (рисунки 1.3) [8]. Її головні переваги — простота програмування через інтегроване середовище Arduino IDE, велика спільнота розробників та наявність численних бібліотек для роботи з різними датчиками і приводами. ATmega328P має тактову частоту 16 МГц, 32 КБ флеш-пам'яті (з яких близько 0,5 КБ використовується для завантажувача), 2 КБ оперативної пам'яті (SRAM) та 1 КБ EEPROM. Цього достатньо для реалізації базових алгоритмів управління, таких як PID-регулювання швидкості двигунів або обробка даних з інфрачервоних датчиків лінії. Однак обмежена обчислювальна потужність і відсутність вбудованих засобів бездротового зв'язку роблять Arduino

Uno менш придатною для складних завдань, таких як обробка зображень або робота з нейромережами.



Рисунок 1.3 — Мікроконтролер Arduino Uno

LOLIN D32, заснований на модулі ESP-WROOM-32, є однією з найбільш функціональних платформ сімейства ESP32, що поєднує високу продуктивність із зручним форм-фактором (рисунок 1.4). Його головні переваги — потужний двоядерний процесор Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, вбудовані бездротові інтерфейси Wi-Fi 802.11 b/g/n та Bluetooth 4.2 (включаючи BLE), а також розширена периферія [9]. Мікроконтролер має 520 КБ оперативної пам'яті (SRAM), 4 МБ флеш-пам'яті (SPIFFS). Плата оснащена 38 GPIO-пінами, включаючи 16 аналогових входів (12-бітні АЦП), 2 ЦАП (8-бітні), а також спеціалізовані інтерфейси для підключення сенсорів (I2C, I2S, SPI, UART, CAN). Цього достатньо для реалізації складних алгоритмів управління, таких як: багатозадачні системи на базі FreeRTOS, обробка даних від кількох сенсорів одночасно, реалізація протоколів машинного навчання (TinyML), робота з мультимедійними даними (аудіо, відео).

Також варто враховувати більше споживання енергії в активному режимі (до 120 мА при максимальній частоті), що може бути важливо для автономних

робототехнічних систем. Проте, перевагою LOLIN D32 є вбудована система керування живленням. На платі є спеціальний роз'єм для підключення літій-полімерних (Li-Po) або літій-іонних (Li-Ion) акумуляторів з напругою від 3,7 до 4,2 В, контролер заряду (струм заряду до 500 мА) з індикацією стану заряду, підтримка глибокого сну зі споживанням всього від 10 до 20 мкА, а також автоматичне перемикання між живленням від USB і батареї.



Рисунок 1.4 — Мікроконтролер LOLIN D32

ESP32-CAM є спеціалізованим модулем на базі мікроконтролера ESP32, який поєднує високопродуктивні обчислювальні можливості з функціями візуального сприйняття (рисунок 1.5). Центральним компонентом системи є двоядерний процесор Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, доповнений 520 КБ оперативної пам'яті та 4 МБ флеш-пам'яті [10].



Рисунок 1.5 — Мікроконтролер ESP32-CAM

Головною відмінною рисою ESP32-CAM є інтегрована 2-мегапіксельна камера OV2640 з підтримкою роздільної здатності до 1600×1200 пікселів. Камера оснащена автоматичною регулюванням експозиції, балансу білого та кольорової температури, що забезпечує стабільну роботу в різних умовах освітлення. Модуль підтримує бездротові інтерфейси Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 ГГц) та Bluetooth 4.2, включаючи низькоенергетичний режим (BLE).

1.4 Аналіз рішень з мультимедійним інтерфейсом у мобільних роботах

Мультимедійні інтерфейси стали невід’ємною частиною сучасних мобільних роботів, забезпечуючи багатоканальну, інтуїтивну й ефективну взаємодію між людиною та машиною. Ці системи виходять далеко за межі простого відображення інформації — вони дозволяють роботам активно сприймати навколишнє середовище, адаптуватися до поведінки користувача, відповідати на команди, а також створювати емоційно залучений і комфортний досвід взаємодії.

Одним із найважливіших компонентів мультимедійного інтерфейсу є дисплей, який виконує роль візуального посередника між користувачем і роботом. Сучасні роботи можуть бути оснащені екранами різного типу — від мінімалістичних OLED-панелей до повнокольорових сенсорних дисплеїв з високою роздільною здатністю [11]. Вони дозволяють відображати широкий спектр інформації: стан системи, маршрути навігації, візуалізацію даних з камер або датчиків, а також інтерактивні меню для керування функціями пристрою. Особливо у роботах, які працюють у соціальному або сервісному середовищі — наприклад, у лікарнях, готелях чи аеропортах дисплей може виконувати функцію "обличчя", демонструючи емоції через графіку, або допомагати в орієнтації користувача в просторі. У роботах-кур'єрах дисплей може містити інформацію про доставлення товару, ідентифікатор замовлення або QR-код для верифікації особи отримувача.

Другим ключовим елементом є аудіосистема, до складу якої входять мікрофони, динаміки та компоненти синтезу мови. У багатьох мобільних роботах саме аудіоінтерфейс є основним каналом комунікації, коли користувач не має

змоги взаємодіяти з дисплеєм — наприклад, коли руки зайняті або людина має порушення зору. Системи розпізнавання мови, підкріплені штучним інтелектом, здатні ідентифікувати інтонації, ключові слова і навіть емоційний стан мовця, адаптуючи реакцію робота відповідно. Динаміки дозволяють не лише відтворювати відповіді, а й реалізовувати аудіоіндикацію: звукові сигнали для попереджень, нагадування або залучення уваги. Наприклад, робот-медик може сповістити персонал про критичний стан пацієнта, або нагадати людині про прийом ліків.

Не менш значущою складовою мультимедійної взаємодії є камери та системи комп'ютерного зору, які забезпечують роботу візуального зворотного зв'язку та сприйняття середовища. Камери виконують не тільки навігаційні завдання (виявлення перешкод, побудова карт), але й дозволяють здійснювати персоналізовану взаємодію з користувачем. Завдяки алгоритмам розпізнавання облич, жестів, міміки, робот може ідентифікувати конкретного користувача, "читати" його емоції та реагувати відповідно — наприклад, змінити тон мови або запропонувати іншу стратегію допомоги. Комп'ютерний зір також дозволяє взаємодіяти з об'єктами — читати QR-коди, аналізувати вміст полиць у магазинах.

Тактильні інтерфейси важливі у завданнях, де потрібна фізична взаємодія або зворотний зв'язок через дотик [12]. Це можуть бути сенсорні кнопки, панелі з розпізнаванням сили натискання, або навіть поверхні з вбудованою тактильною віддачею — наприклад, вібрацією. Наприклад, у роботах для людей з вадами зору тактильна віддача може сигналізувати про зміну маршруту або небезпеку попереду.

Проекційні системи дозволяють роботам виводити інформацію без використання фізичних екранів. За допомогою мініатюрних проекторів роботи можуть проектувати зображення на стіни, підлогу або навіть на руки користувача. Такий підхід дає змогу уникати встановлення великогабаритних дисплеїв, що важливо у компактних мобільних пристроях.

Існують новітні та експериментальні рішення, які відкривають горизонти для майбутнього мультимедійної взаємодії. Одним із таких напрямів є використання

спрямованого звуку — технології, яка дозволяє передавати аудіо повідомлення у вузько направленому пучку. Завдяки цьому звук чути лише в межах певного просторового сектору.

Інший цікавий напрям це доповнена (AR) та віртуальна реальність (VR), де робот стає частиною гібридного середовища: AR-окуляри можуть накладати цифрові підказки поверх реального світу, а VR-інтерфейси імітувати управління роботом на відстані [13]. Такі технології вже тестуються в освітньому середовищі, у сфері логістики та розваг, де потрібна висока точність взаємодії з користувачем. Очікується, що в майбутньому інтеграція цих рішень дозволить створити більш інтуїтивно зрозумілі системи керування та зменшити поріг входу для нових користувачів.

1.5 Приклади реалізованих систем автономного руху

Сучасні системи автономного руху вже давно вийшли за межі лабораторій і сьогодні активно використовуються в транспорті, логістиці, агропромисловості, медицині та сервісному обслуговуванні. В основі таких систем лежать складні програмно-апаратні комплекси, що включають датчики (лідари, камери, ультразвукові сенсори), алгоритми навігації (GPS-навігація, маршрутизація на основі штучного інтелекту), системи ухилення від перешкод і адаптивного планування руху.

Одним із найяскравіших прикладів сучасної автономної робототехніки є складські роботи компанії Amazon Robotics (рисунок 1.6) [14]. Ці роботи інтегровані у велику логістичну екосистему Amazon і щодня обробляють тисячі замовлень у найсучасніших розподільчих центрах. Вони використовують комбіновану систему навігації, яка базується на QR-кодах, нанесених безпосередньо на поверхню підлоги, а також на лідарному скануванні навколишнього середовища. QR-коди забезпечують точне локальне позиціонування, дозволяючи роботам швидко орієнтуватися у внутрішньому просторі складу. Такі роботи здатні автономно транспортувати стелажі з вантажами до 350 кг, переміщуючи їх до відповідних зон пакування або зберігання.



Рисунок 1.6 — Роботи Amazon Robotics

У медичній сфері використовуються системи автономного транспорту, такі як роботи TUG від Aethon (рисунок 1.7) [15].



Рисунок 1.7 — Робот Aethon TUG T3

Вони використовують 3D-картування приміщення в поєднанні з сенсорами зіткнення для безпечного переміщення між палатами. Особливістю цих систем є адаптивні алгоритми, які враховують динамічні зміни у середовищі - відкриті двері, рухомий персонал або тимчасові перешкоди. Точність навігації досягається за рахунок комбінації візуальної інформації з камер, датчиків обертання коліс і прецизійних вимірювальних блоків.

У міському середовищі цікавим прикладом є автономні роботи-кур'єри Starship Technologies (рисунок 1.8) [15]. Їхня навігаційна система обробляє дані з 12 камер, ультразвукових датчиків, радарів і GPS. Спеціальні алгоритми дозволяють розпізнавати пішоходів, транспортні засоби та інфраструктурні об'єкти, прогнозуючи їх рух. Унікальність полягає в здатності працювати у складних умовах міського ландшафту — на тротуарах, перехрестях, у районах з високими будівлями, що погіршують GPS-сигнал. Для покращення точності використовується технологія SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), яка постійно оновлює внутрішню карту середовища.



Рисунок 1.8 — Робот-кур'єр Starship Technologies

2 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА РОЗРОБКА КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Мікропроцесорна платформа Arduino Uno

Мікроконтролер є основним елементом у побудові кіберфізичного робота, оскільки він забезпечує обробку даних у реальному часі, виконання логіки керування, підтримку інтерфейсів зв'язку та пряме управління виконавчими механізмами. На відміну від традиційних комп'ютерних систем, мікроконтролери мають компактні розміри, низьке енергоспоживання, високий рівень інтеграції та здатність функціонувати в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Для кіберфізичної системи, що рухається по лінії, важливо максимально швидко реагувати на сигнали з датчиків і відповідно керувати моторами. Наявність апаратної підтримки ШІМ (PWM) дозволяє точно регулювати швидкість коліс, а інтегровані аналого-цифрові перетворювачі забезпечують швидке оцифрування показів інфрачервоних датчиків лінії. Не менш важливим є захист від перешкод і стабільність роботи при перепадах напруги, оскільки по лінії живлення можуть бути пульсації самоіндукції від двигунів. Крім того, мікроконтролер повинен мати достатню кількість інтерфейсів для підключення додаткових модулів. Програмованість і підтримка сучасних мов програмування (наприклад, C++ або MicroPython) дозволяють реалізувати складні алгоритми, такі як ПІД-регулятори для плавного коректування траєкторії, водночас залишаючись у межах обмежень пам'яті та енергоресурсів. Таким чином, оптимальний мікроконтролер для системи навігації поєднує в собі технічні характеристики, спрямовані на швидкість реакції, енергоощадність та гнучкість у розширенні функціоналу.

Arduino Uno є однією з найпоширеніших платформ на різних рівнях робототехнічних проєктів, значною мірою завдяки своїй простоті, відкритості та оптимальному співвідношенню ціни й функціональності. Мікроконтролер ATmega328P забезпечує достатні обчислювальні ресурси для реалізації алгоритмів керування, обробки сенсорної інформації, управління виконавчими механізмами та обміну даними з іншими пристроями.

Архітектура ATmega328P побудована на 8-розрядному ядрі AVR RISC, яке виконує більшість інструкцій за один такт [16]. Такий підхід дозволяє зменшити час виконання коду навіть при відносно невисокій тактовій частоті у 16 МГц. Для задач реального часу — наприклад, обробки сигналів з сенсорів або генерації керуючих ШІМ-імпульсів — це означає забезпечення мінімальної затримки між подією та відповіддю системи.

Пам'ять ATmega328P має поділ на три основні типи: Flash — для зберігання програми, SRAM — для динамічних змінних, і EEPROM — для збереження налаштувань між перезавантаженнями (рисунок 2.1). Такий розподіл дозволяє реалізовувати достатньо складні алгоритми. Наприклад, Flash-пам'яті вистачає для реалізації алгоритмів PID-регулювання, обробки лінійних сенсорів, Bluetooth-комунікації та керування двигунами в одному проєкті. EEPROM, хоч і невелика за обсягом, корисна для зберігання калібрувальних коефіцієнтів сенсорів, конфігурацій маршрутів чи PID-параметрів.

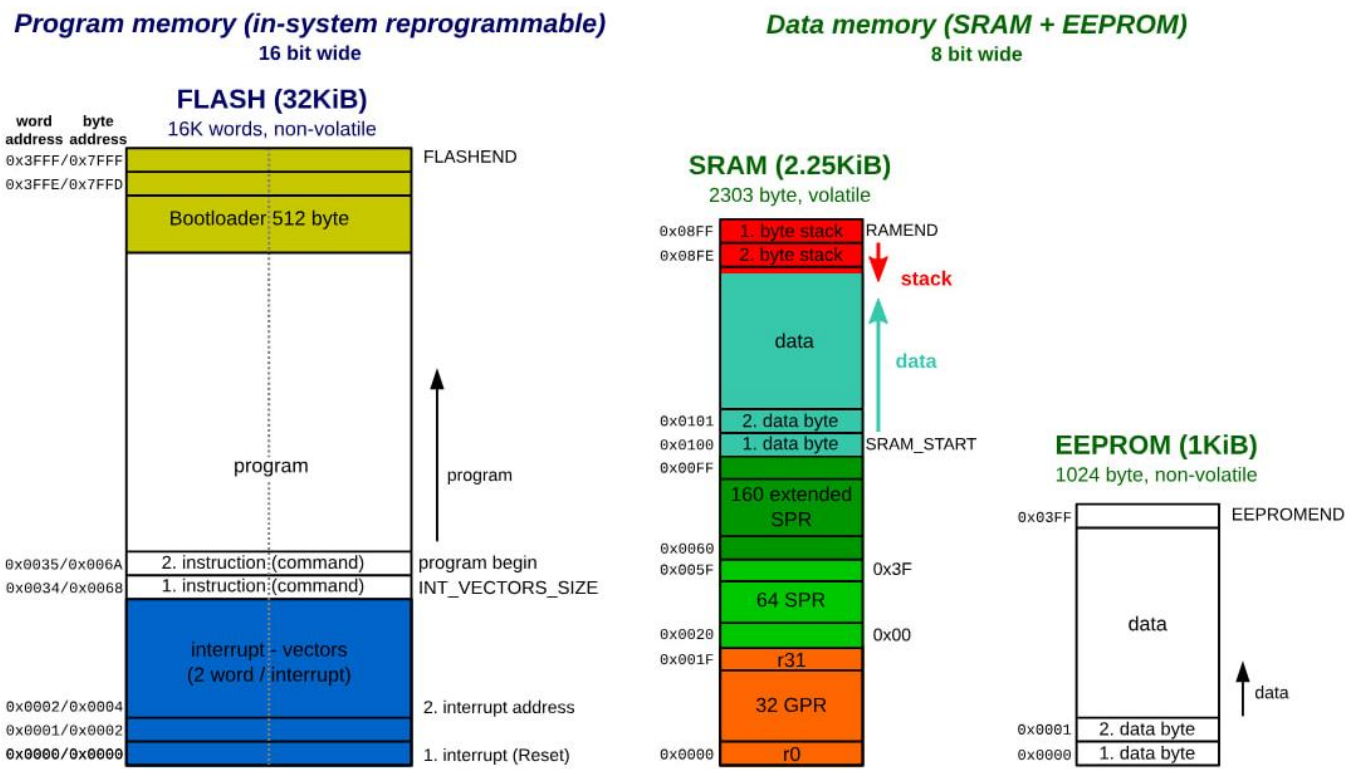


Рисунок 2.1 — Карта пам'яті ATmega328P

Достатній набір інтерфейсів зв'язку дозволяють реалізувати взаємодію, як з сенсорними модулями, так і з іншими мікроконтролерами або периферійними пристроями (рисунк 2.2). Інтерфейс UART використовується для обміну з комп'ютером. ІС підходить для підключення модулів гіроскопів, екранів, дозволяючи використовувати лише два дроти для кількох пристроїв. Інтерфейс SPI дає змогу досягати високої швидкості обміну інформації.

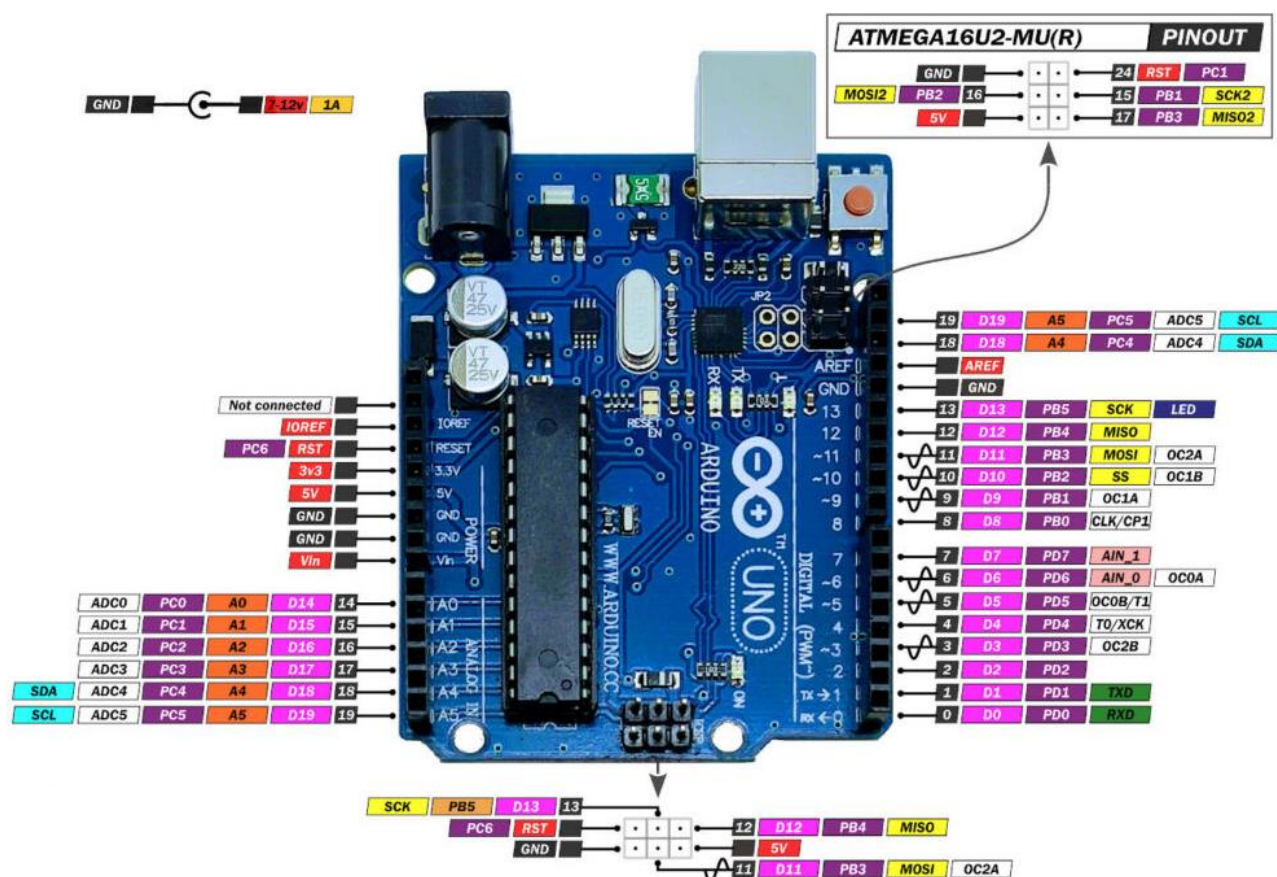


Рисунок 2.2 — Розміщення та призначення виводів платформи Arduino UNO

Таймери та лічильники, які дозволяють реалізовувати точне керування часом без навантаження основного циклу програми. Arduino Uno має три таймери: два 8-бітних і один 16-бітний. Вони можуть бути використані для генерації ШІМ-сигналів, відліку часових інтервалів, реалізації програмних затримок або організації енкодерного вводу. Саме точна робота таймерів дає можливість досягати стабільної частоти PWM для керування двигунами без шумів і стрибків.

Ще один важливий функціональний блок — аналогово-цифровий перетворювач. У ATmega328P реалізовано 10-бітний АЦП з 6 каналами. Він дозволяє отримувати значення напруги від аналогових датчиків (наприклад, фотодатчиків або потенціометрів) з роздільною здатністю до 1024 рівнів. АЦП працює з опорними напругами 1.1 В, 5 В. Швидкість перетворення, хоча й обмежена частотою від 10000 до 15000 вибірок на секунду, є достатньою для більшості задач робототехніки.

Вбудовані у мікроконтролер аналогові компаратори можуть бути використані для швидкого порівняльної сигналів без аналого-цифрового перетворення.

2.2 Функції ESP32-CAM для віддаленої взаємодії

Arduino Uno має обмежені ресурси — повільний 8-бітний процесор, мало пам'яті (2 КБ SRAM) і відсутність вбудованого Wi-Fi або Bluetooth. Через це вона не може обробляти зображення, передавати відео чи працювати з телеметрією в реальному часі. Для таких задач потрібен окремий модуль, наприклад ESP32-CAM, який має камеру, швидкий процесор і бездротовий зв'язок.

ESP32-CAM — це мікроконтролерна плата, створена на чипі ESP32-S виробництва Ai-Thinker, яка поєднує в собі процесор, оперативну пам'ять, флеш-пам'ять та периферійні інтерфейси. Платформа призначена для реалізації компактних, автономних пристроїв із підтримкою відеозйомки, бездротового зв'язку та обробки даних. В основі плати лежить мікропроцесор Tensilica Xtensa LX6 із двома 32-бітними ядрами, які працюють на частоті до 240 МГц. Така обчислювальна потужність дозволяє обробляти зображення, виконувати алгоритми машинного зору, розпізнавання облич та інші ресурсоємні завдання.

Для забезпечення швидкодії чип має 520 КБ вбудованої SRAM-пам'яті. Цього обсягу недостатньо для більшості мультимедійних сценаріїв, тому в ESP32-CAM додатково інтегровано 4 МБ псевдостатичної пам'яті PSRAM, яка розміщена на окремому чипі, з'єднаному з ESP32-S через SPI. Для збереження прошивки та основних даних плата має 4 МБ флеш-пам'яті. Для збереження великих обсягів

інформації, зокрема зображень або логів телеметрії, плата має слот для карт microSD, що підтримує файлову систему FAT32. Швидкість роботи з картою пам'яті обмежена пропускнуою здатністю SPI-шини, однак цього достатньо для періодичного збереження знімків або текстових логів.

Одна з головних особливостей ESP32-CAM — модуль камери OV2640 (рисунок 2.3). Це CMOS-сенсор із роздільною здатністю до 2 мегапікселів (максимум 1600×1200 пікселів) [17]. Камера підтримує кілька форматів виводу: JPEG, YUV422/420, RGB565/555, а також 8-бітне стиснене зображення. Формат JPEG є найпоширенішим для трансляції зображень по мережі, бо дозволяє значно зменшити розмір кадру. Частота знімання залежить від роздільної здатності та навантаження на систему, в середньому вона становить від 15 до 30 кадрів за секунду при зниженій якості, що є прийнятним для потокового відео.



Рисунок 2.3 — Модуль камери OV2640

Платформа має вбудовані модулі бездротового зв'язку — Wi-Fi стандарту IEEE 802.11 b/g/n та Bluetooth 4.2 (включно з BLE). Це дозволяє платі як створювати власну точку доступу (режим SoftAP), так і підключатися до вже існуючих мереж (режим STA). На практиці це означає, що пристрій можна легко інтегрувати в локальну мережу або надати до нього віддалений доступ через інтернет. Bluetooth використовується рідше, бо радіомодуль Wi-Fi і Bluetooth

використовують спільний передавач, і одночасна робота обох каналів обмежена. Для передачі відео основним засобом комунікації залишається саме Wi-Fi.

Для реалізації веб-інтерфейсу ESP32-CAM часто налаштовується, як HTTP-сервер. У такому режимі мікроконтролер запускає веб-сервер, до якого можна підключитися з браузера, і в реальному часі отримувати JPEG-знімки з камери. Ці знімки послідовно передаються на клієнтську сторону через протокол HTTP у вигляді окремих кадрів, створюючи ефект потокового відео. Альтернативно, можлива передача даних через RTSP (Real Time Streaming Protocol), однак вона вимагає реалізації більш складної логіки та використання зовнішніх клієнтів, сумісних із цим протоколом.

Передача зображень у реальному часі передбачає стиснення кожного кадру камерою до JPEG-формату, збереження у пам'яті та відправлення по мережі. Враховуючи обмежену пропускну здатність Wi-Fi та обмеження по оперативній пам'яті, максимальна частота кадрів коливається в межах від 8 до 15 fps при середній роздільній здатності (наприклад, 640×480). Зі збільшенням якості зображення кількість доступної пам'яті зменшується, що призводить до зниження частоти кадрів і ризику втрати стабільності системи. Для передачі зображень також використовуються альтернативні методи, наприклад, надсилання кадрів на хмарні сервіси через HTTP POST або FTP. У цьому випадку знімок зберігається у форматі JPEG у тимчасовій пам'яті або на microSD, після чого надсилається на сервер. Це дозволяє використовувати ESP32-CAM як частину більшого IoT-комплексу, де кадри з камер обробляються або зберігаються централізовано.

ESP32-CAM не має вбудованого USB-інтерфейсу, тому для прошивки необхідне зовнішнє підключення через UART. Під час прошивки необхідно перевести плату в режим завантаження, замкнувши GPIO0 на землю. Після цього прошивка передається через послідовний порт з комп'ютера.

На платі передбачено кілька GPIO-виводів, більшість із них вже задіяна для камери та пам'яті (рисунок 2.4). Тому в користувача залишається обмежена кількість доступних портів для підключення зовнішніх пристроїв. Проте деякі виводи підтримують ADC, PWM, SPI, UART, I2C [18].

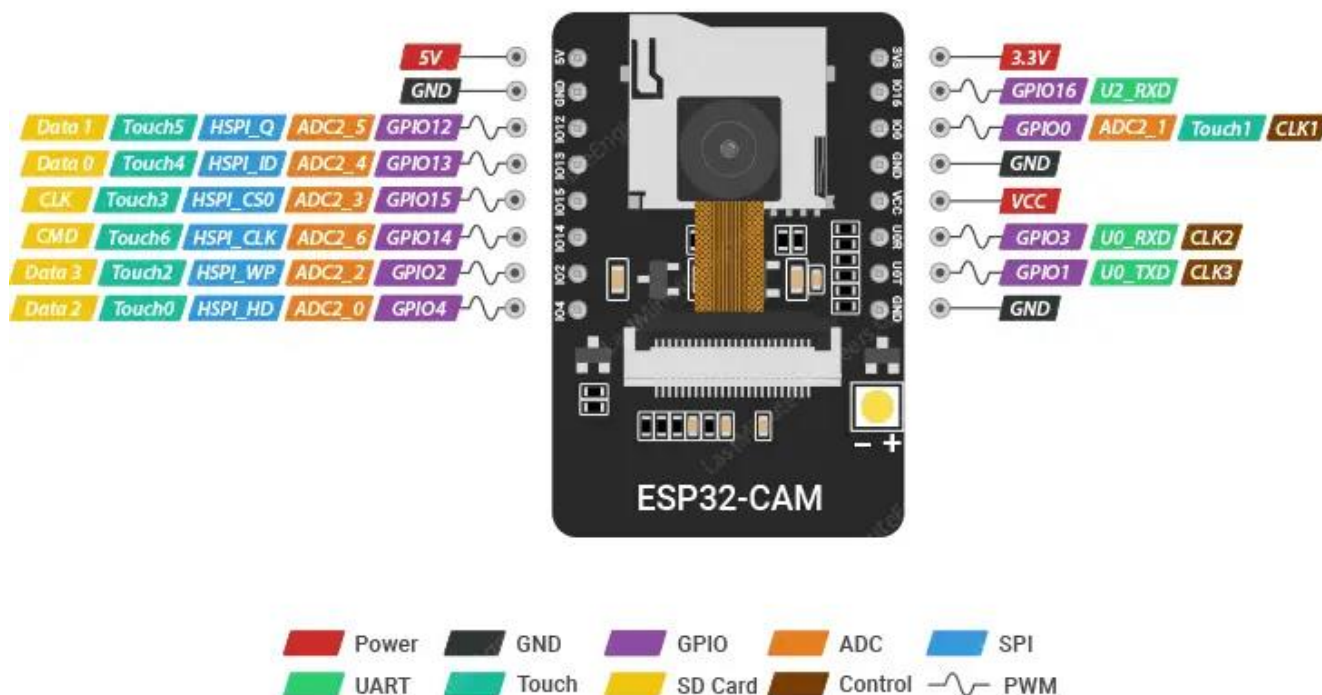


Рисунок 2.4 — Розміщення та призначення виводів платформи ESP32-CAM

ESP32-CAM має два світлодіоди: один білий для підсвічування при зйомці, інший червоний індикаторний (на GPIO33), який можна використовувати як сигналізатор стану.

Загалом ESP32-CAM — це компактна, продуктивна плата для реалізації систем із відеоспостереженням, автономного моніторингу або мультимедійних робототехнічних платформ. Її особливості роблять її зручною для застосування у складі кіберфізичних систем, де необхідна передача зображень, прийом команд, локальне зберігання інформації та бездротове з'єднання з мережею.

2.3 Застосування LOLIN D32 для обробки аудіо та індикації

Для реалізації світлових ефектів і відтворення звуку було обрано плату ESP32 LOLIN D32. Цей контролер підтримує інтерфейс I2S, який необхідний для роботи з цифровими аудіомодулями. Також плата має різноманітні варіанти живлення. Завдяки великій кількості доступних GPIO та підтримці бездротових технологій, її

легко підключати до зовнішніх пристроїв для керування світлодіодами, динаміками та іншими модулями (рисунок 2.5) [19].

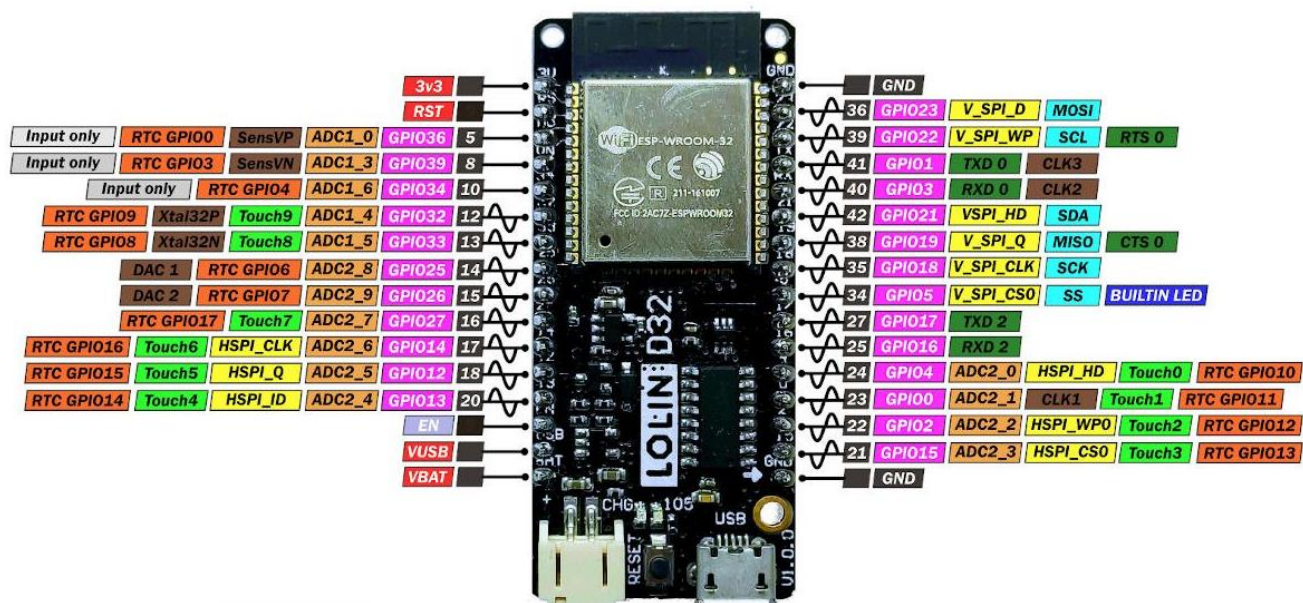


Рисунок 2.5 — Розміщення та призначення виводів платформи LoLin D32

Плата LOLIN D32 — це мікроконтролер на базі чіпа ESP32, який розроблений компанією Espressif. Вона створена як компактне, потужне та універсальне рішення для проєктів, де потрібна більша обчислювальна продуктивність, розширена підтримка інтерфейсів та бездротовий зв'язок. На відміну від класичних Arduino-плат, LOLIN D32 оснащена двоядерним процесором Tensilica Xtensa LX6, що працює на частоті до 240 МГц. Ця архітектура дозволяє виконувати паралельні задачі, наприклад, обробку сигналів і одночасну передачу даних по Wi-Fi або Bluetooth.

Пам'яті для виконання програм також більше, ніж у стандартних Arduino. LOLIN D32 має 520 КБ оперативної пам'яті (SRAM), а також зовнішню пам'ять типу PSRAM (часто 4 МБ), яка активується на деяких версіях плати. Такий обсяг RAM критично важливий для задач, пов'язаних із буферизацією звуку, обробкою сигналів або відображенням візуальних ефектів, наприклад, при керуванні матрицями WS2812 або генерації аудіопотоку.

Ще однією перевагою LOLIN D32 є наявність вбудованого модуля Wi-Fi 802.11 b/g/n і Bluetooth v4.2 (BR/EDR, BLE), які забезпечують бездротовий зв'язок як у локальній мережі, так і з мобільними пристроями. Це дозволяє зручно організовувати управління пристроєм дистанційно або передавати дані, наприклад, телеметрію, аудіосигнали чи керування LED-світлом через смартфон чи сервер.

Живлення плати LOLIN D32 реалізоване дуже. Плата підтримує живлення як від стандартного USB-порту, так і від акумулятора, що дозволяє використовувати її як у стаціонарних, так і в переносних проєктах. Через micro-USB можна подавати напругу для живлення самої плати та заряджання акумулятора одночасно. За керування живленням відповідає вбудований контролер заряду літієвого акумулятора. В платі реалізоване автоматичне перемикання між живленням від акумулятора і USB без перезавантаження пристрою. Якщо USB-кабель під'єднаний, живлення надходить від нього, а акумулятор одночасно заряджається. Якщо ж USB від'єднати, живлення одразу переходить на акумулятор, що забезпечує безперервну роботу пристрою. Для цього не потрібні додаткові перемикачі або втручання користувача — перемикання відбувається на апаратному рівні. Струм зарядки становить 500 мА. Для підключення акумулятора на платі є окремий контакт для підключення з маркуванням "BAT".

Програмування LOLIN D32 виконується через Arduino IDE або PlatformIO, за допомогою звичайного micro-USB кабелю, без потреби у додаткових адаптерах, як у випадку з ESP32-CAM. Це значно спрощує процес розробки та налагодження. Плата також підтримує оновлення прошивки «по повітрю», що дозволяє завантажувати нові версії програмного забезпечення через Wi-Fi без фізичного доступу до пристрою.

2.4 Огляд додаткових модулів

Для відтворення аудіо в проєкті було обрано цифровий аудіо підсилювач на базі модуля MAX98357, що забезпечує ефективну та якісну обробку звукових сигналів із цифрового джерела через інтерфейс I2S [20]. Такий модуль ідеально

поєднується з мікроконтролерами, дозволяючи будувати повністю цифрову звукову систему без потреби в додаткових цифро-аналогових перетворювачах.

MAX98357 — це клас D підсилювач, який приймає цифрові аудіосигнали у форматі I2S і безпосередньо передає їх на динамік (рисунок 2.6). Основною перевагою цього рішення є висока енергоефективність, що досягається завдяки принципу ШІМ-модуляції (PWM), при якій транзистори працюють переважно в режимах повного відкривання або закривання. Завдяки цьому втрати потужності на тепловиділення мінімальні, а сам підсилювач залишається компактним і не потребує радіаторів. Максимальна потужність модуля 3 Вт при живленні 5 В і підключенні 4-омного динаміка, хоча при цьому можливе певне зростання спотворень сигналу. Живлення 3,3 В також підтримується, однак максимальна вихідна потужність при цьому буде нижчою.



Рисунок 2.6 — Підсилювач MAX98357

Оскільки модуль використовує I2S-інтерфейс, для його підключення необхідні три основні сигнальні лінії: BCLK (bit clock), LRCLK або LRC (left-right clock) і DIN (data in). Важливо не плутати вивід SD з DIN: перший слугує для керування режимом роботи, тоді як другий є фактичним входом цифрового аудіо. Помилкове використання SD як data-in призведе до повної відсутності звуку.

Модуль MAX98357A підтримує ручну зміну коефіцієнта підсилення за допомогою виводу GAIN. Якщо цей пін залишити нез'єднаним, можливе виникнення паразитного шуму або нестабільної роботи. У практичних реалізаціях рекомендується підключати його через резистор, наприклад, 100 кОм до землі для

отримання максимального підсилення. Залежно від конфігурації, також можна встановити інші значення посилення, які визначаються внутрішніми резистивними дільниками.

Налаштування стерео або моно режиму, а також активації/деактивації модуля здійснюється через вивід SD (Shutdown/Mode). Цей пін багатофункціональний і визначає канал, який буде відтворюватися. Якщо залишити SD "високим" (наприклад, під'єднати до живлення), модуль працюватиме у моно режимі, приймаючи сигнал з лівого каналу. Для вибору правого каналу SD підтягується через резистор приблизно 39 кОм (або 47 кОм — безпечніше для живлення 5 В) з урахуванням внутрішнього дільника напруги. Якщо під'єднати SD до землі, модуль переходить у режим вимкнення. Таким чином, зміною цього сигналу можна гнучко обирати режим роботи (моно з одного з каналів або повне вимкнення) без потреби змінювати прошивку.

Для відтворення звуку необхідний не лише підсилювач, а й динамік, до якого передається підсилений сигнал. У даній роботі використовується динамік динамічного типу з номінальним опором 4 Ом і максимальною потужністю 5 Вт, що забезпечує достатній запас потужності для роботи з підсилювачем MAX98357 (рисунок 2.7). Така конфігурація дозволяє відтворювати звукові повідомлення, сигнали або аудіофрагменти з достатньою гучністю та мінімальними спотвореннями, навіть при тривалому навантаженні.



Рисунок 2.7 — Динамік 5 Вт 4 Ом

Динамік побудований на основі класичної електродинамічної конструкції — дифузор, звукова котушка та магнітна система утворюють коливальний контур, що перетворює електричні сигнали на звукові хвилі. Завдяки відповідності опору і запасу потужності, даний динамік добре узгоджується з характеристиками MAX98357, який при живленні 5 В здатний видавати до 3 Вт на 4-омне навантаження. При цьому динамік не перевантажується і працює стабільно навіть при максимальній гучності.

Динамік має компактні розміри, що дозволяє зручно вбудувати його в корпус мобільного пристрою. Варто встановити його в частково закритому об'ємі (наприклад, корпусі або камері з вихідним отвором), щоб покращити відтворення басів і забезпечити більш спрямоване звучання. Без корпусу високі частоти залишаються чіткими, однак загальна якість звучання дещо знижується.

Підключення динаміка до модуля MAX98357 здійснюється через виводи L+ і L—. Важливо підкреслити, що жоден із цих контактів не є загальним, і підключення одного з них до землі неприпустиме. Така конфігурація дозволяє ефективніше використовувати живлення, підвищуючи амплітуду сигналу без потреби у негативному джерелі напруги. При монтажі важливо дотримуватися мінімізації електромагнітних завад: провідники до динаміка повинні бути якомога коротшими, а за наявності поруч інших високочастотних елементів — екранізованими або розведеними окремо. Оскільки звуковий сигнал формується цифровим методом через I2S-інтерфейс, якість живлення та заземлення підсилювача прямо впливають на чистоту відтворення. Для стабільної роботи рекомендується застосовувати конденсатори між VDD та GND модуля.

Для відтворення світлової індикації було використано адресні світлодіоди. Це тип світлодіодів, які можуть керуватись індивідуально по одному дроту, тобто кожен світлодіод у ланцюгу отримує свою власну інформацію про колір і яскравість, завдяки вбудованій мікросхемі керування. Найвідомішими представниками таких світлодіодів є модулі, побудовані на базі мікросхем WS2812 та її варіацій (WS2812B, WS2813, SK6812 тощо). Ці мікросхеми забезпечують цифрове управління кожним світлодіодом окремо в єдиному ланцюгу, що дозволяє

створювати анімовані ефекти, плавні переходи та складні кольорові візерунки без використання складної проводки.

Основний принцип роботи полягає в тому, що кожен світлодіод має свою мікросхему-декодер, яка зчитує цифрові дані, що надходять по одній лінії (DIN). Мікросхема бере лише ті дані, що адресовані саме їй (перші 24 біти для першого світлодіода, наступні 24 — для другого, і так далі), і передає решту даних на наступний світлодіод через вихід DOUT [21].

Протокол передачі даних базується на широтно-імпульсній модуляції, де тривалість високого та низького рівня сигналу визначає значення біта 0 або 1. На рисунку показано, як саме передається кожен біт.

Для передачі 0 сигнал спочатку утримується на високому рівні протягом короткого часу ($T_{0H} = 0.4$ мкс), після чого опускається в низький рівень ($T_{0L} = 0.85$ мкс). Для передачі 1 високий рівень тримається довше ($T_{1H} = 0.8$ мкс), а низький коротше ($T_{1L} = 0.45$ мкс). Загальна тривалість одного біта близько 1.25 мкс, що забезпечує частоту передачі біля 800 кГц. Після передачі даних усім світлодіодам, контролер генерує сигнал скидання (Reset) — низький рівень, який тримається більше 50 мкс. Це дає змогу кожному світлодіоду зберегти отримані дані та оновити свій стан (вивести відповідний колір). Кожен світлодіод отримує 24 біти інформації: по 8 біт на кожен колір (зелений, червоний, синій) у форматі GRB. Адресні світлодіоди не мають власної адреси — порядок у ланцюгу визначається фізичним розташуванням. Перший світлодіод зчитує перші 24 біти і передає решту далі, другий — наступні 24 і т.д. Це дозволяє створювати довгі стрічки світлодіодів, які можна контролювати лише одним виводом мікроконтролера.

На рисунку 2.8 представлена каскадна схема підключення WS2812B. Світлодіоди отримують живлення (VDD, VSS) від джерела 5V, і мають два цифрові контакти: DIN (вхід) і DOUT (вихід). Вивід DOUT першого світлодіода підключається до DIN другого, утворюючи ланцюг. Кожна мікросхема має затримку сигналу, щоб зчитати свої дані та передати залишок далі. Для стабільності живлення використовуються керамічні конденсатори (наприклад, 0.1 мкФ) між

VDD і GND біля кожного світлодіода, що запобігає стрибкам напруги при зміні кольору.

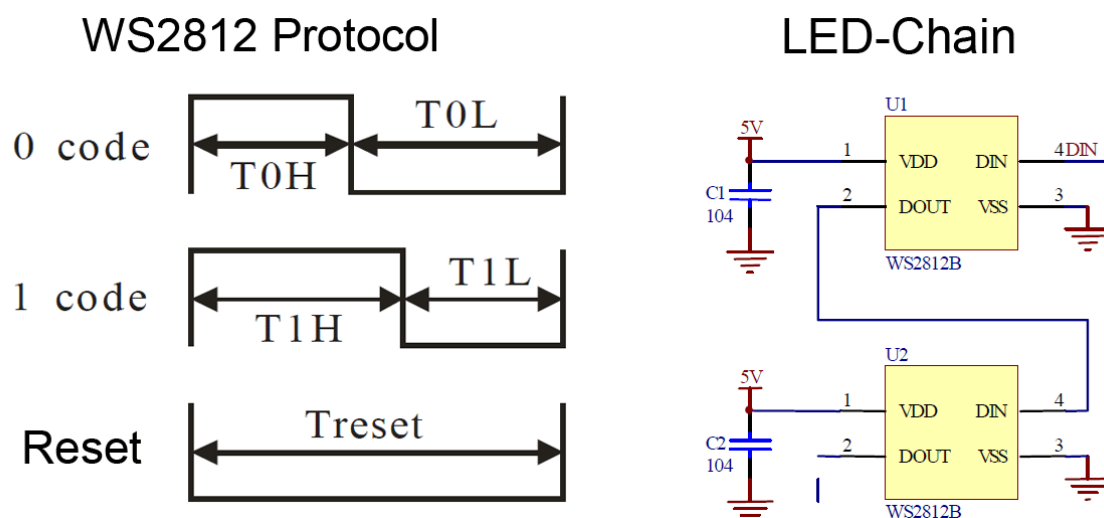


Рисунок 2.8 — Протокол WS2812 і схема підключення світлодіодів

Щодо типів адресних світлодіодів, вони відрізняються форм-фактором, кольоровим спектром і додатковими можливостями. Наприклад, WS2812B це найпопулярніший варіант у вигляді SMD компонента, а SK6812 має додатковий білий канал (RGBW), що дає чистіший білий колір. WS2813 підтримує резервну лінію передачі даних, що дозволяє уникнути виходу з ладу всього ланцюга при пошкодженні одного елемента.

Адресні світлодіоди випускаються у великій варіації форм-факторів, що дозволяє адаптувати їх під найрізноманітніші задачі. Найпоширенішим форматом є гнучка світлодіодна стрічка, в якій світлодіоди вже інтегровані разом зі конденсаторами на м'якій платі, з нанесеними провідниками та розміткою для обрізання. Такі стрічки зручно згинати, розрізати на сегменти і монтувати в будь-яких площинах, тому їх широко використовують у побутовому освітленні.

Існують також жорсткі модулі у вигляді прямих або гнучких плат, кільця, квадрати, матриці та інші геометричні фігури з розведеними доріжками та конденсаторами на кожному світлодіоді (рисунок 2.9). Кільця часто використовуються в приладах індикації або декоративних панелях, а матриці

дозволяють створювати цілі екрани з піксельною адресацією, які здатні відображати текст, зображення або навіть відео.



Рисунок 2.9 — Кільце з 24 адресованими світлодіодами WS2812B

2.5 Структурна та принципова електрична схеми

Під час створення роботизованої системи, було прийнято рішення використати готову платформу ELEGOO Smart Robot Cat Kit V4.0, яка уже має плату розширення з розведеною електронікою. Завдяки цьому розробка окремої принципової електричної схеми для основного контролера та плати керування не була необхідною.

Загальній структурній схемі видно архітектуру взаємодії між апаратними модулями та програмними функціями (рисунок 2.10). Система працює на двох основних контролерах — Arduino UNO та ESP32. Arduino UNO приймає сигнали від ультразвукових та інфрачервоних датчиків. Ці сигнали обробляються, проходячи через функціональні блоки обробки, після чого передаються драйверам пристроїв, які керують безпосередньо двигунами. Така архітектура дозволяє UNO виконувати основні завдання: керування рухом, обхід перешкод, розпізнавання траєкторій, кольорову індикацію тощо. ESP32 виконує роль модуля віддаленого керування та передачі даних. Вона отримує сигнали з мобільного телефону через

Wi-Fi і передає їх у систему, а також відповідає за обробку та передачу відео з камери. Взаємодія між ESP32 і UNO здійснюється через послідовний інтерфейс UART.

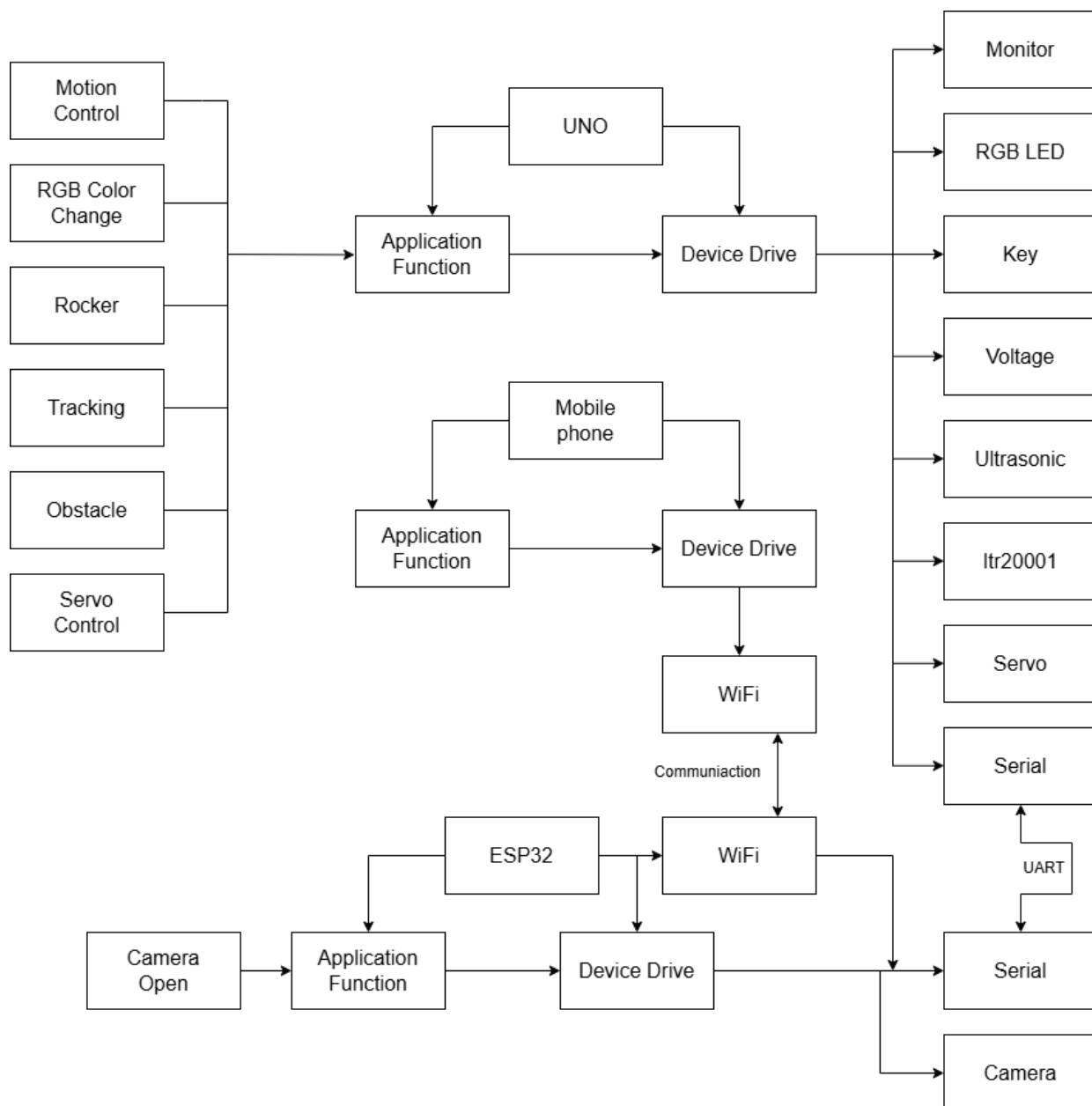


Рисунок 2.10 — Структурна схема роботизованого комплексу

Підсистема звукової та світлової індикації була спроектована та реалізована з нуля. Принципова схема на рисунку 2.11 показує апаратну реалізацію підсистеми, зібраної на мікроконтролері ESP32 (модуль LOLIN D32). Джерелами живлення є літій-іонний акумулятор на 3.7 В, підключений через вимикач SW1, також є можливість підключення зовнішнього джерела живлення з напругою в діапазоні

від 6 до 18 В через понижувальний перетворювач Mini360 (U2). Світлова індикація реалізована за допомогою стрічки WS2812B, яка підключена резистор обмеження струму (220 Ом) до одного з цифрових виходів ESP32. Звукова індикація реалізована на підсилювачі MAX98357 (U3), до якого підключено динамік (SP1). Цей модуль отримує сигнали від ESP32 по лініях LRC, BCLK, DIN.

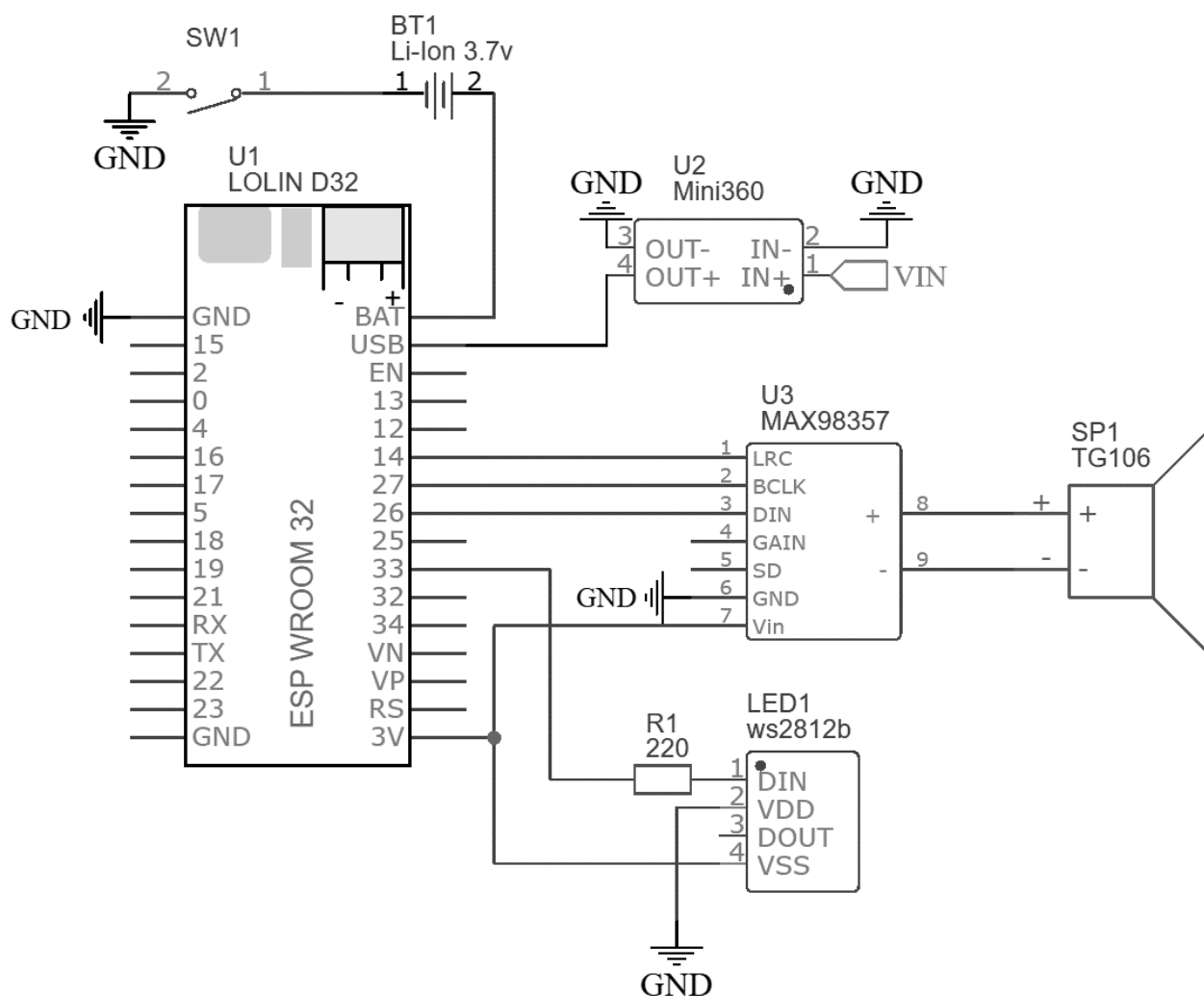


Рисунок 2.11 — Схема підсистеми звукової та світлової індикації

2.6 Система живлення

Живлення для всієї системи побудоване на основі літій-іонних акумуляторів типу 18650 (рисунок 2.12). Для продовження строку служби літій-іонних акумуляторів рекомендується уникати повного розряду нижче 3.0 В і не допускати зарядки до 100% — оптимальним є діапазон від 20% до 85%. Також бажано

зберігати батареї при кімнатній температурі та не залишати їх на довгий час повністю зарядженими або розрядженими.

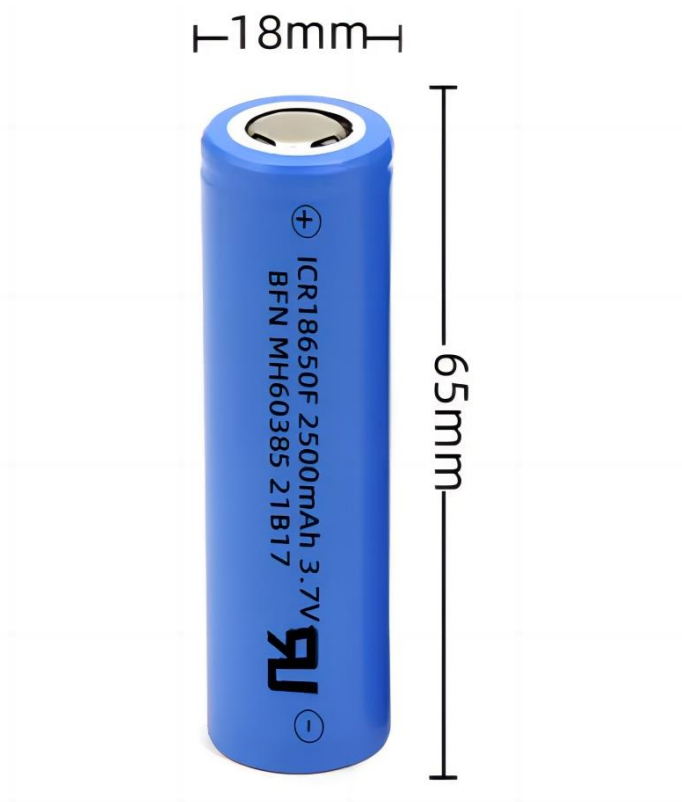


Рисунок 2.12 — Акумулятор формату 18650

На платі розширення встановлений DC-DC перетворювач напруги, який понижує напругу з 7,4 В, отриманих від акумулятора до стабільних 5 В, необхідних для живлення більшості підключених модулів. Проте під час подальших модифікацій системи варто враховувати, що цей стабілізатор має обмежену номінальну потужність, і його можливостей може бути недостатньо для живлення додаткових потужних компонентів. Через це варто встановити окремий зовнішній стабілізатор напруги, або повністю замінити штатний DC-DC перетворювач на більш потужний. Для кіберфізичної системи ідеально підходить імпульсний понижуючий перетворювач mini360, він дешевий, малий і його потужності вистачає для забезпечення стабільного живлення (рисунок 2.13).

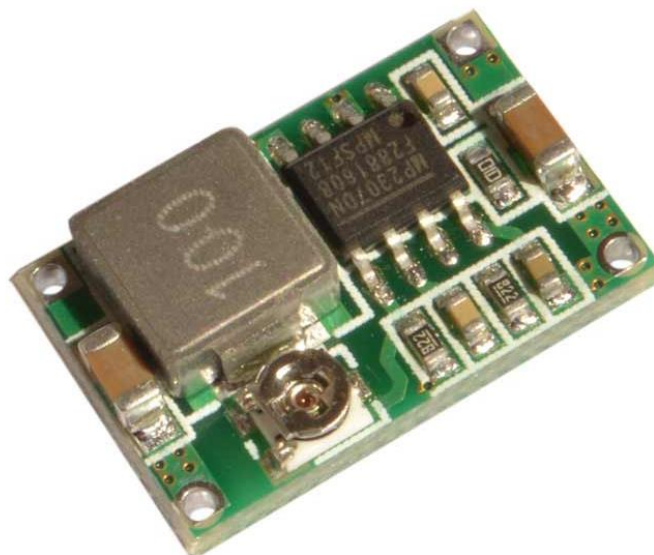


Рисунок 2.13 — Понижуючий перетворювач Mini360

Важливим заходом безпеки є також дотримання максимальної сили струму на виходах GPIO. Наприклад, при керуванні світлодіодною стрічкою WS2812B (яка підключена до одного з цифрових пінів контролера) використовується послідовний резистор на 200 Ом, щоб уникнути імпульсного перевантаження порту. Це захищає як сам контролер, так і модуль індикації при ввімкненні або зміні рівня сигналу.

Загалом, система живлення і безпеки побудована так, щоби всі компоненти могли працювати одночасно, автономно та стабільно, без взаємного негативного впливу. При цьому в будь-який момент можна замінити або від'єднати один із модулів без ризику для решти системи, що робить конструкцію зручною для подальших модифікацій.

З КОМПОНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Збірка компонентів системи

Першим етапом збирання роботизованого комплексу на основі ELEGOO Smart Robot Cat Kit V4.0 є встановлення моторів на основну платформу [22]. Від правильного розташування і надійного кріплення моторів залежить, як стабільно буде рухатись робот, чи не буде виникати перекосів і втрат потужності.

Як видно на рисунку 3.1, на платформі передбачено монтаж чотирьох моторів з редукторами — по два з кожного боку, тобто симетрично. Така схема є класичною для роботів з незалежним приводом кожного колеса, оскільки дозволяє здійснювати як прямолінійний рух, так і розвороти на місці за допомогою зміни напрямку обертання пар моторів.

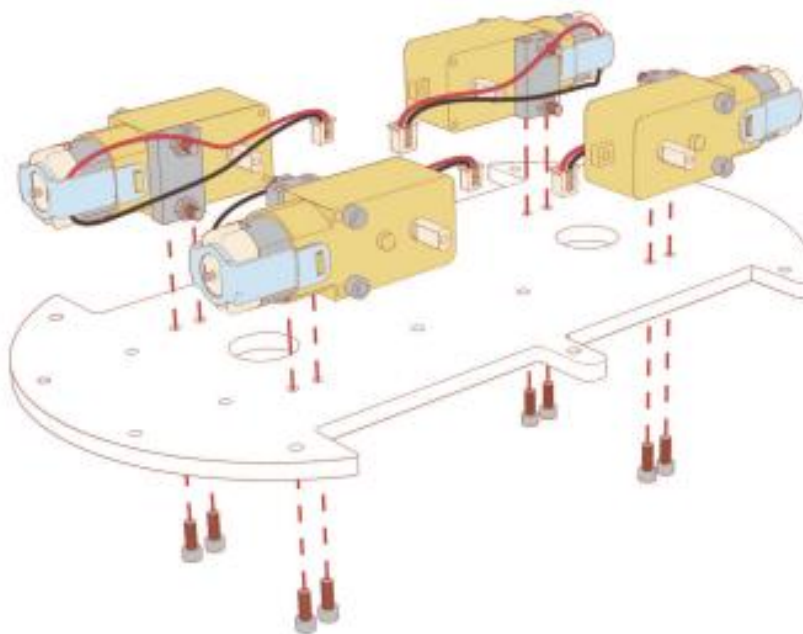


Рисунок 3.1 — Кріплення моторів до нижньої частини платформи

Платформа має відповідні отвори, які вже підготовлені для кріплення моторів. Кожен мотор орієнтується таким чином, щоб його вісь із колесом була направлена до краю платформи, а проводи виходили догори — це полегшить подальше підключення. Кріплення здійснюється за допомогою гвинтів і гайок. У зображенні добре видно, що через кожен мотор проходять два гвинти, які йдуть

крізь корпус платформи вгору. Гайки ставляться зверху і щільно затягуються — це забезпечує надійне з'єднання. Важливо не перетягнути, щоб не пошкодити пластик або корпус мотора, але й не залишити послаблень, щоб уникнути вібрацій під час руху. Проводи мають бути одразу виведені вгору і направлені до центру платформи. Це важливо зробити на цьому етапі, поки доступ до моторів відкритий, і щоб уникнути закручування або защемлення проводів у наступних етапах. В майбутньому це спростить їх підключення до драйвера моторів або контролера.

На наступному етапі встановлюється датчик лінії. Він монтується з нижнього боку платформи, у передній частині робота (рисунок 3.2). Це забезпечує правильне зчитування поверхні перед колесами. Через чотири отвори в основі пропускаються гвинти. Знизу на них встановлюються пластикові втулки, які виступають як роздільники між платформою та датчиком. Вони визначають висоту над поверхнею, на якій буде працювати датчик, тому важливо, щоб усі втулки були однаковими і розташовані рівно. Датчик фіксується знизу гайками. Всі гайки закручуються рівномірно, щоб не деформувати плату і не змістити її нахил.

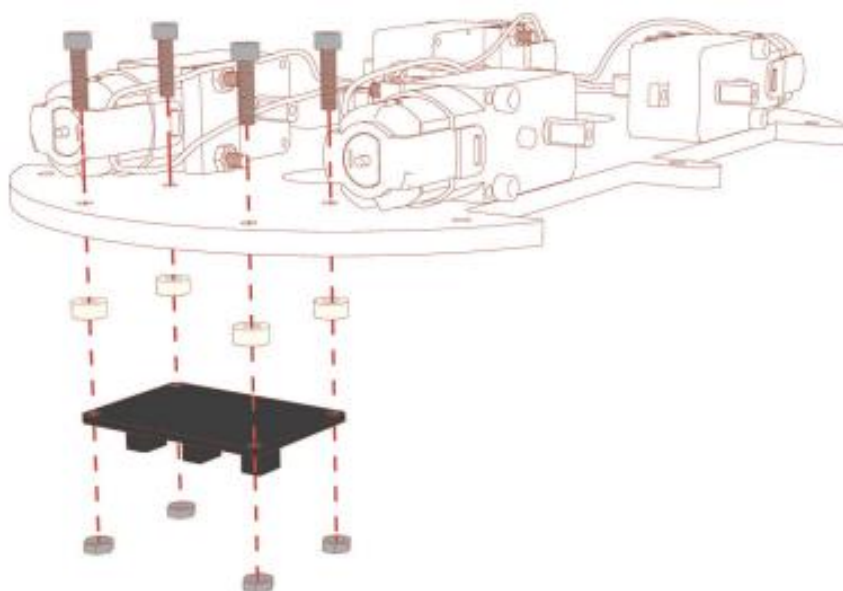


Рисунок 3.2 — Монтаж оптичного датчика для слідування за лінією

На наступному етапі виконується встановлення плати Arduino Uno та її плати розширення (рисунок 3.3). Спочатку встановлюється плата Arduino Uno. Її

розміщують у відповідних отворах на верхній частині платформи. Під неї вставляються пластикові втулки, які відокремлюють плату від поверхні шасі. Це необхідно, щоб уникнути короткого замикання між контактами на звороті плати та металевими частинами або гвинтами. Після цього Arduino Uno надійно фіксується гвинтами зверху через всі отвори.

Після того як Arduino Uno надійно закріплена, зверху на неї встановлюється плата розширення. Вона щільно насаджується на роз'єми Arduino і не потребує окремого кріплення — її утримують контактні піни. Слід переконатись, що всі піни вставлені рівно і повністю, без перекосів. Це забезпечить надійне з'єднання та стабільну роботу усіх підключених компонентів.

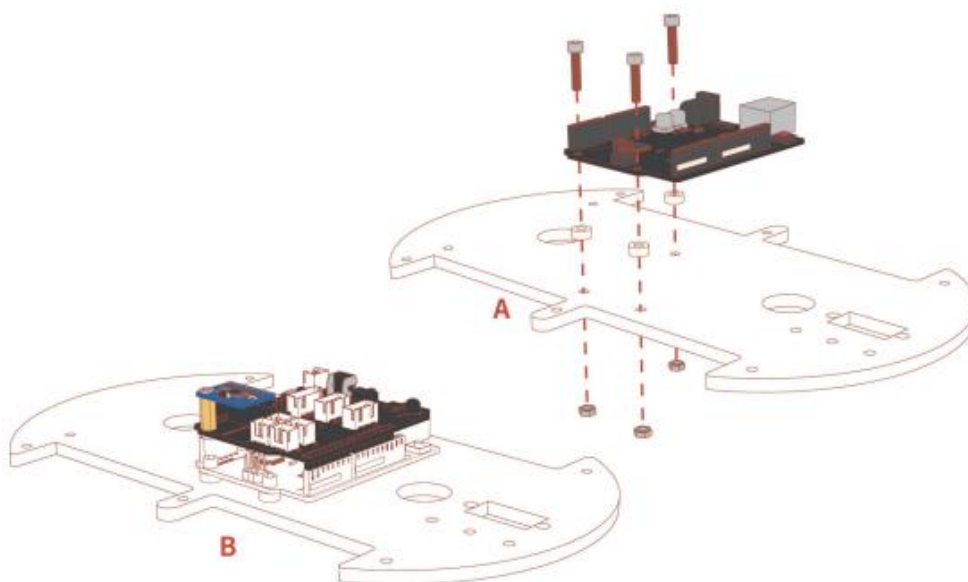


Рисунок 3.3 — Монтаж Arduino Uno та плати розширення

Для встановлення акумулятора необхідно закріпити його на верхній частині платформи за допомогою двох гвинтів (рисунок 3.4). Акумулятор слід розташувати так, щоб отвори в корпусі акумулятора збігалися з отворами в платформі. Далі потрібно вставити гвинти зверху вниз через корпус акумулятора та отвори в платформі. З нижнього боку платформи встановлюються гайки для фіксації гвинтів. Потрібно затягнути гвинти так, щоб акумулятор був надійно закріплений, але не деформувався корпусом.

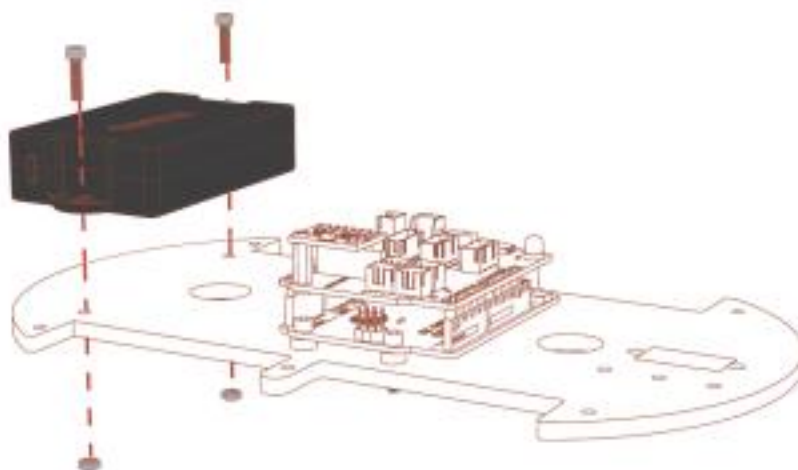


Рисунок 3.4 — Установка аккумулятора на платформу

Для складання модуля камери, ESP32-CAM має бути закріплена на монтажній пластині. Для цього з тильної сторони монтажної пластини прикручуються дистанційні втулки (рисунок 3.5). Після цього на втулки встановлюється плата ESP32-CAM, яка фіксується за допомогою гайок. Коли плата закріплена, підключається шлейф для передачі живлення і даних.

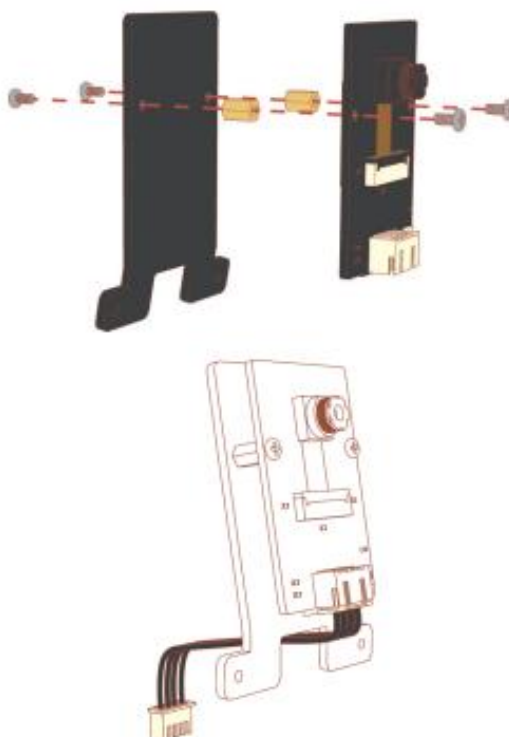


Рисунок 3.5 — Установка аккумулятора на платформу

Збірка ультразвукового модуля починається з встановлення кріплення сервопривода (рисунок 3.6). Воно прикручується до приводу за допомогою двох гвинтів, які проходять крізь монтажні отвори в пластиковій основі. Після фіксації кріплення забезпечується жорстке з'єднання, яке дозволяє точно передавати обертальний рух сервопривода до встановленого датчика. Далі до верхньої панелі цього кріплення прикручується сам ультразвуковий датчик. Він встановлюється так, щоб випромінювач і приймач були направлені вперед. Датчик вирівнюється та фіксується гвинтами, які вставляються з лицьового боку та закручуються з тильної сторони.

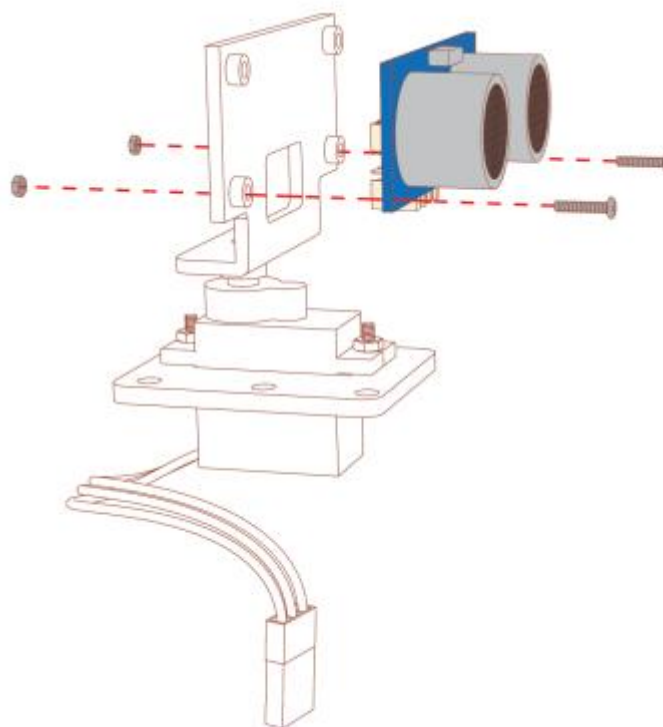


Рисунок 3.6 — Збірка ультразвукового модуля з сервоприводом

Для об'єднання двох модулів — камери та ультразвукового датчика використовується загальна конструкція на базі сервопривода. Камера з уже закріпленою платою ESP32-CAM встановлюється позаду модуля ультразвукового датчика (рисунок 3.7). Між двома модулями розміщуються дистанційні втулки, які забезпечують необхідний зазор і дозволяють жорстко закріпити камеру. Гвинти проходять крізь корпус камери, втулки та монтажні отвори на кріпленні

ультразвукового модуля, після чого затягуються. Таким чином, обидва модулі фіксуються в одній спільній конструкції, здатній повертатися завдяки сервоприводу. Це дозволяє одночасно використовувати камеру і датчик відстані.

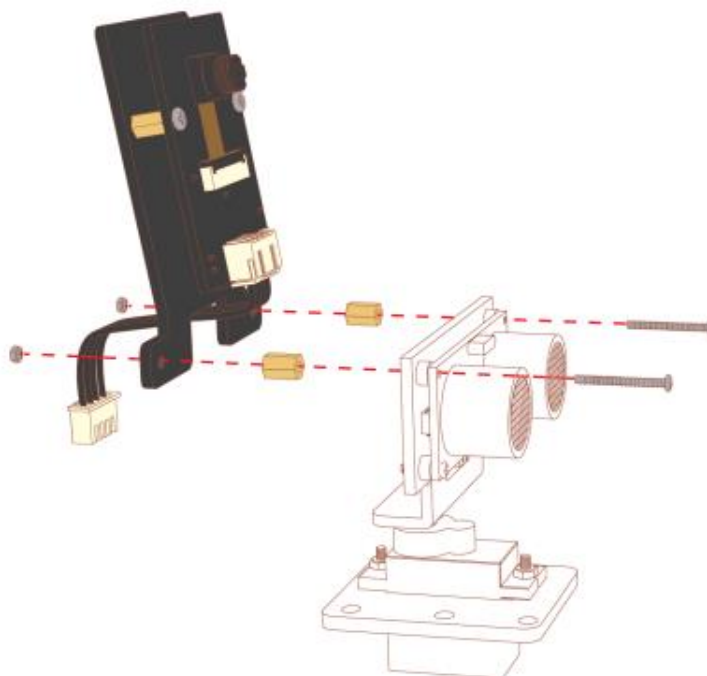


Рисунок 3.7 — Об'єднання модуля камери з ультразвуковим модулем

Після з'єднання камери та ультразвукового модуля вся конструкція встановлюється на основу платформи. Модуль розміщується у передній частині корпусу, де передбачені відповідні монтажні отвори (рисунок 3.8). Сервопривод із закріпленими на ньому модулями акуратно встановлюється на монтажну пластину та вирівнюється згідно з отворами для фіксації, щоб забезпечити правильне розташування під час подальшої експлуатації. Гвинти вставляються зверху через прорізи в корпусі сервопривода і проходять крізь основу платформи. Зі зворотного боку встановлюються гайки і затягуються до моменту, коли з'єднання стає жорстким і не допускає люфтів. У результаті модуль камери й ультразвукового датчика надійно кріпиться до платформи, залишаючись при цьому мобільним завдяки можливості обертання, яку забезпечує сервомеханізм. Це дозволяє системі активно змінювати напрямок огляду в горизонтальній площині.

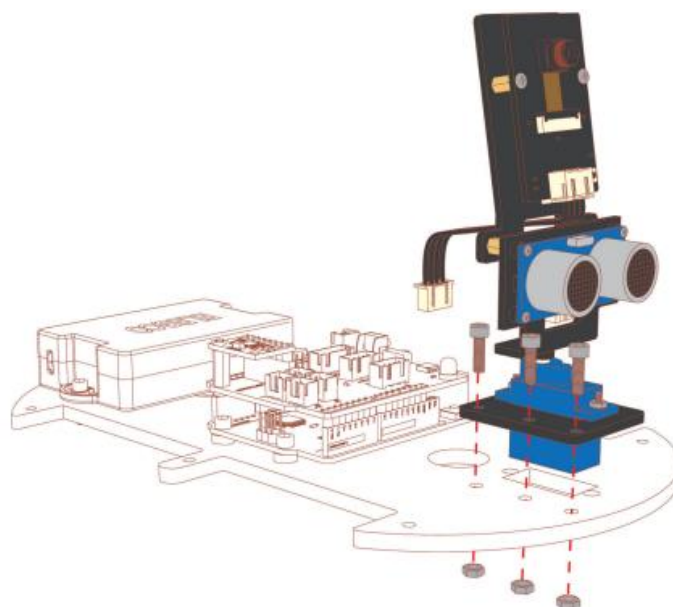


Рисунок 3.8 — Встановлення модуля камери та ультразвукового датчика на платформу

Перед з'єднанням верхньої та нижньої частин платформи виконуються підготовчі дії. У вже зібрану нижню частину платформи, на якій розміщені мотор-редуктори, вставляються гвинти крізь монтажні отвори (рисунок 3.9). Після цього з верхнього боку на гвинти нагвинчуються дистанційні стійки. Вони виконують функцію проміжного з'єднання між рівнями конструкції та забезпечують необхідний простір для розміщення електронних компонентів і проводки.

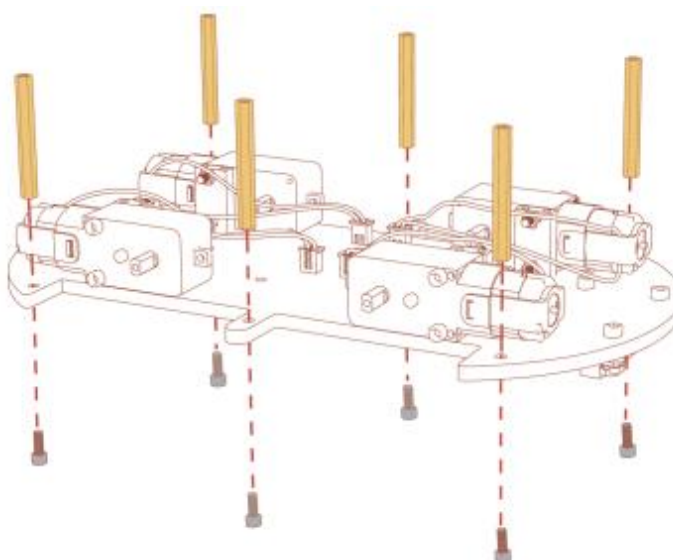


Рисунок 3.9 — Підготовка до об'єднання верхньої та нижньої платформ

Гвинти затягуються знизу за допомогою гайок, щоб закріпити стійки на місці. Усі з'єднання мають бути надійно зафіксовані, оскільки на них у подальшому спиратиметься верхня платформа з основними модулями. Після завершення цього етапу конструкція готова до встановлення верхнього рівня.

На завершальному етапі конструкції здійснюється об'єднання верхньої та нижньої платформ. Верхня платформа обережно встановлюється на попередньо закріплені дистанційні стійки (рисунок 3.10). Її отвори мають точно співпасти з різьбовими отворами у стійках, щоб забезпечити правильне розміщення усіх модулів та елементів конструкції. Після вирівнювання платформи гвинти вставляються у відповідні отвори зверху та загвинчуються у стійки. Усі гвинти затягуються рівномірно, щоб забезпечити жорсткість з'єднання та уникнути перекосів. Після цього конструкція робота набуває завершеного вигляду, а всі модулі на платформі фіксуються надійно й готові до експлуатації.

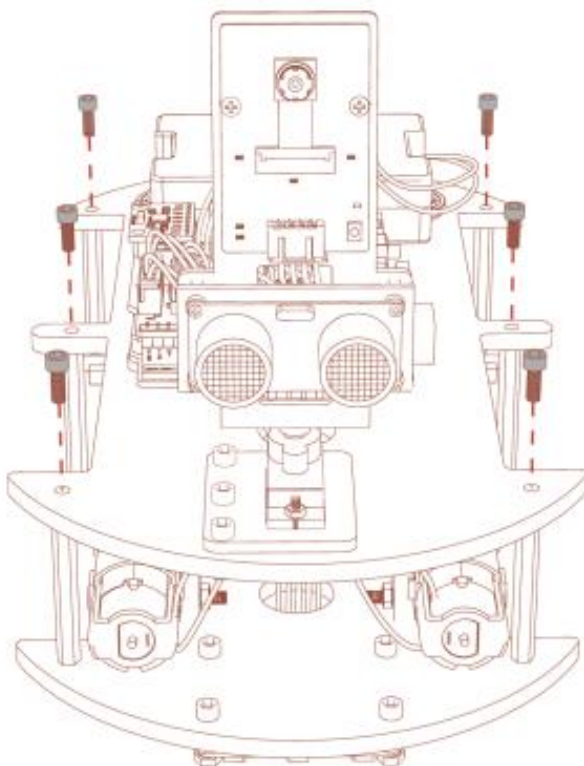


Рисунок 3.10 — З'єднання верхньої та нижньої платформ

На фінальному етапі збирання робота виконується встановлення коліс (рисунок 3.11). Кожне колесо насаджується на вихідний вал відповідного

мотор-редуктора, розміщеного на нижній платформі. Вали повинні точно входити у центральні отвори коліс, забезпечуючи щільне посадження без люфту. Після вирівнювання колеса фіксуються за допомогою гвинтів, які вставляються через отвори в колісних дисках і загвинчуються у вал. Після завершення цього етапу мобільна роботизована платформа готова до роботи.

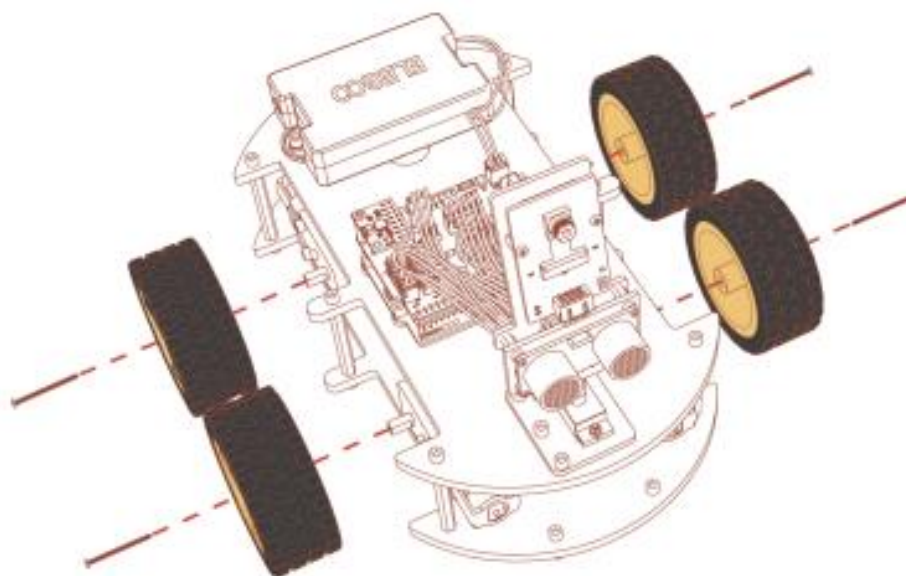


Рисунок 3.11 — Встановлення коліс на платформу

3.2 Підключення Arduino Uno до виконавчих механізмів

Після завершення механічного складання конструкції всі виконавчі елементи повинні бути підключені до відповідних роз'ємів плати керування згідно з передбаченою схемою. Кожен компонент має бути приєднаний відповідно до свого призначення, із дотриманням полярності, правильного розташування сигналів і напруги живлення. Особлива увага має бути приділена правильному підключенню моторів, сервоприводу, камери, ультразвукового модуля, лінійного трекера та живлення, адже помилки на цьому етапі можуть призвести до неправильної або непередбачуваної роботи пристрою. Усі підключення мають виконуватися при вимкненому живленні, щоб уникнути коротких замикань або стрибків напруги. Всі з'єднання, особливо ті, що забезпечують живлення бажано перевірити тестером перед першим запуском систем.

3.2.1 Опис плати розширення

Для підключення керуючої електроніки — Arduino Uno разом із виконавчими модулями використовується спеціалізована плата розширення, яка монтується безпосередньо на Arduino Uno через стандартні конектори, дублює всі виводи, а також додає зручні колодки для живлення, моторного управління та підключення сенсорів (рисунок 3.12).

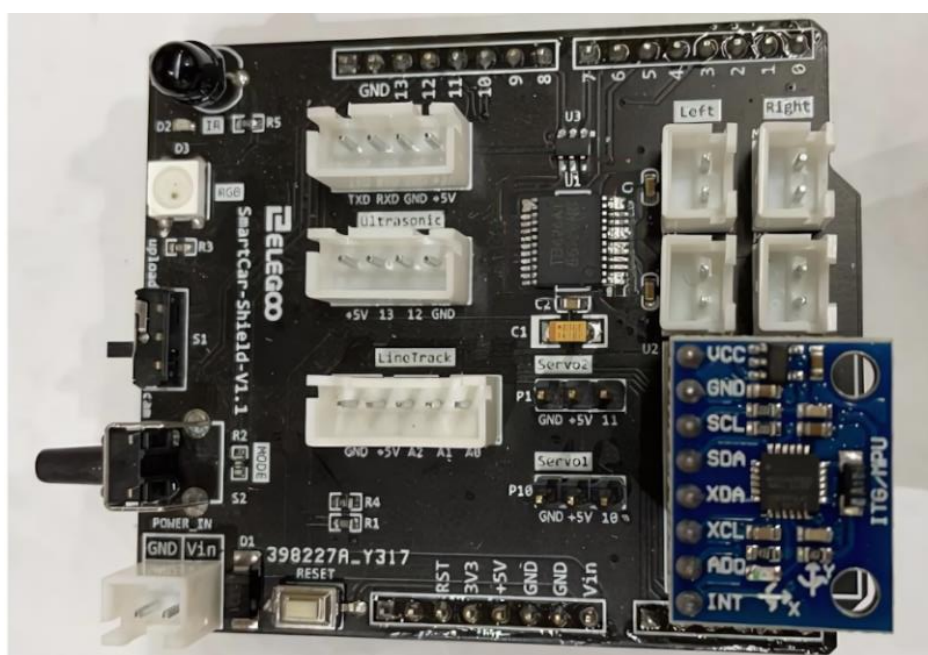


Рисунок 3.12 — Плата розширення

Однією з ключових особливостей цієї плати є вбудований драйвер двигунів TB6612, який дозволяє безпосередньо керувати двома DC-моторами в режимі H-мосту. Виводи AO1, AO2 і BO1, BO2 з цього драйвера виведені на окремі клеми, до яких підключаються лівий та правий мотори відповідно. Управління напрямком і швидкістю руху здійснюється за допомогою ШІМ-сигналів, які генеруються Arduino Uno. Кожен мотор можна незалежно вмикати/вимикати, змінювати напрямок обертання, а також регулювати швидкість за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Це забезпечує маневреність мобільної платформи, включно з розворотом на місці та поворотами з різними радіусами.

На платі також передбачені роз'єми для підключення сервоприводів. Наприклад, серводвигун, який відповідає за поворот ультразвукового датчика, підключається до виділеного порту Servo. Цей роз'єм одразу забезпечує подачу живлення 5 В і сигнальний канал, що значно спрощує монтаж. Стандартні серводвигуни потребують живлення від 4.8 до 6 В, тому використання п'ятивольтової лінії живлення з плати розширення є цілком прийнятним і не перевантажує Arduino Uno.

Ще однією важливою частиною є лінія живлення. Вся система працює від напруги від 7.2 до 8.4 В, яка подається на роз'єм "POWER_IN". Ця напруга проходить через діод SS34 для захисту від переполюсовки, а далі стабілізується до 5 В для живлення логіки та сенсорів. На платі розширення передбачені стабілізовані виходи +5 В та GND, що розведені по декількох колодках і дозволяють зручно підключати додаткові модулі: лінійні сенсори, індикатори, ультразвуковий датчик та інше.

Для інфрачервоних датчиків слідування за лінією передбачений спеціальний порт "Line Tracking", який виводить 3 цифрові сигнали з пінів Arduino Uno: D2, D3 та D4. Це дає змогу легко зчитувати значення з трьох сенсорів без потреби в додатковій логіці. На цих пін-кодах реалізована стандартна цифрова логіка HIGH або LOW залежно від того, чи виявив сенсор чорну лінію.

Додатково плата містить інтерфейс UART (TX/RX), який можна використовувати для підключення модулів зв'язку ESP32 CAM, а також спеціальні роз'єми для I2C-шини (A4 — SDA, A5 — SCL), які дозволяють підключати акселерометр MPU6050.

3.2.2 Підключення виконавчих елементів

Усі елементи конструкції повинні бути з'єднані відповідно до схеми, що зображена на рисунку 3.13, з дотриманням напрямків підключення та положення компонентів. Це дозволяє уникнути помилок у збиранні та забезпечує правильне функціонування пристрою після завершення монтажу.

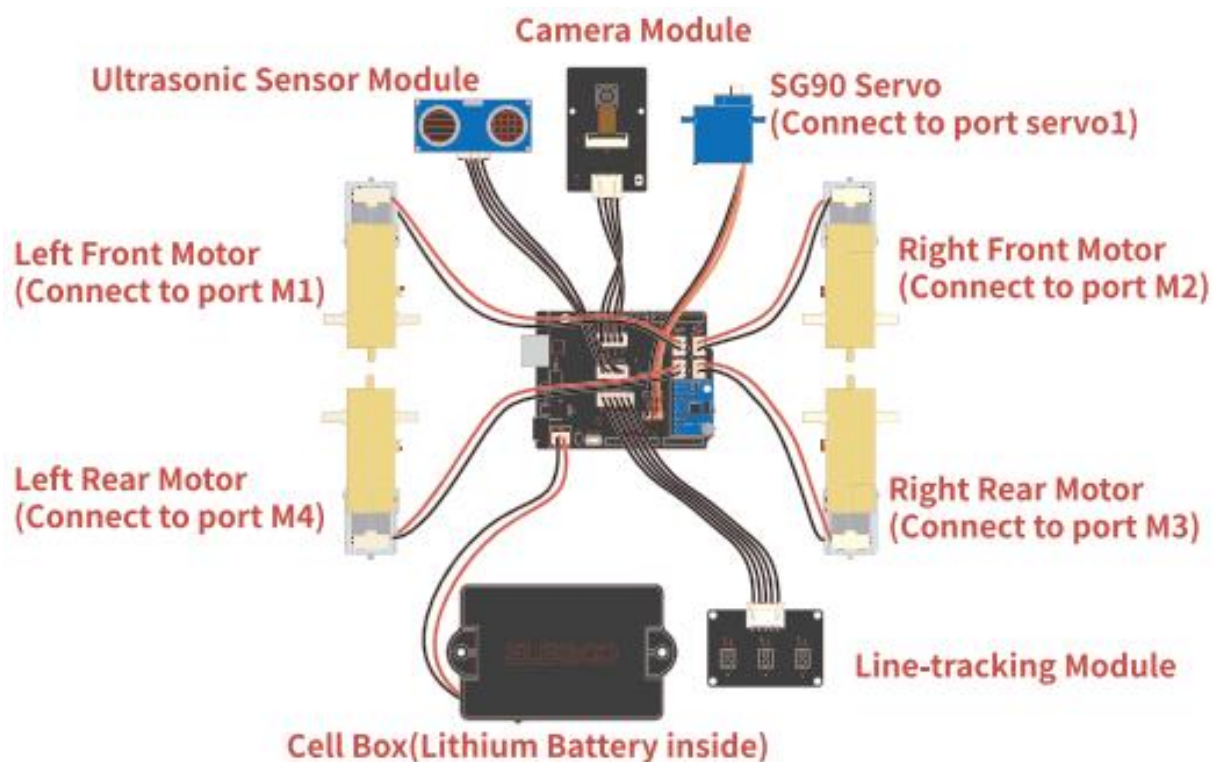


Рисунок 3.13 — Схема підключення виконавчих елементів до плати керування

Чотири двигуни, розташовані на шасі, повинні бути підключені до портів M1, M2, M3 та M4 на платі. При цьому лівий передній мотор під'єднується до порту M1, правий передній до M2, правий задній до M3, а лівий задній до M4. Контакти двигунів мають бути з'єднані без перекручування дротів, з дотриманням полярності, що вказана на платі. Якщо полярність буде змінена місцями, напрямок обертання моторів також буде змінено, що порушить алгоритми руху.

Сервопривід має бути під'єднаний до порту, позначеного як servo1. При цьому сигнальний дрід, що зазвичай має світле забарвлення, підключається до цифрового піну, червоний дрід — до живлення (VCC), а коричневий — до землі (GND). Для забезпечення надійної роботи сервоприводу має бути забезпечене стабільне живлення, оскільки при зміні положення сервомеханізм може споживати значну кількість струму.

Камера, реалізована на основі модуля ESP32-CAM, підключається через роз'єм, розташований на платі. Живлення та сигнали передачі даних подаються через шлейф, який повинен бути акуратно вкладений, без перегинів та натягу.

Ультразвуковий датчик, який встановлено на кронштейні з сервоприводом, під'єднується до цифрових портів плати: один пін для сигналу Trigger, інший для прийому сигналу Echo. Крім того, до датчика має бути підведено живлення.

Модуль для відстеження лінії підключається до плати через спеціальні входи. Контакти мають бути вставлені відповідно до маркування, при цьому сенсори повинні бути розташовані якомога ближче до поверхні, але без дотику. Усі з'єднання перевіряються на предмет правильності полярності та фіксації в роз'ємах.

Акумуляторна батарея, встановлена в спеціальний бокс, під'єднується до плати керування через окремий роз'єм. Перед подачею живлення перевіряється полярність і заряд акумулятора. Живлення має подаватися лише після повного підключення всіх виконавчих елементів, щоб уникнути короткого замикання або некоректної ініціалізації компонентів.

Після підключення усіх виконавчих елементів виконується перевірка надійності фіксації роз'ємів і проводів, а також цілісності дрітів. Тестування функціональності кожного модуля здійснюється вже після подачі живлення, відповідно до програмного забезпечення, що контролює логіку роботи системи.

Схема підключення виконавчих елементів до плати керування зображена на рисунку.

3.3 Реалізація звукової та світлової індикації за допомогою LOLIN D32

У рамках створення мультимедійного інтерфейсу для кіберфізичної системи було реалізовано функціональну підсистему світлової та звукової індикації (рисунок 3.14). Обидві реалізовані на базі платформи LOLIN D32, яка створена на мікроконтролері ESP32. Цей чип має необхідні обчислювальні ресурси та периферію для обробки як цифрового аудіо через інтерфейс I2S, так і генерації візуальних ефектів через адресні світлодіоди WS2812B.

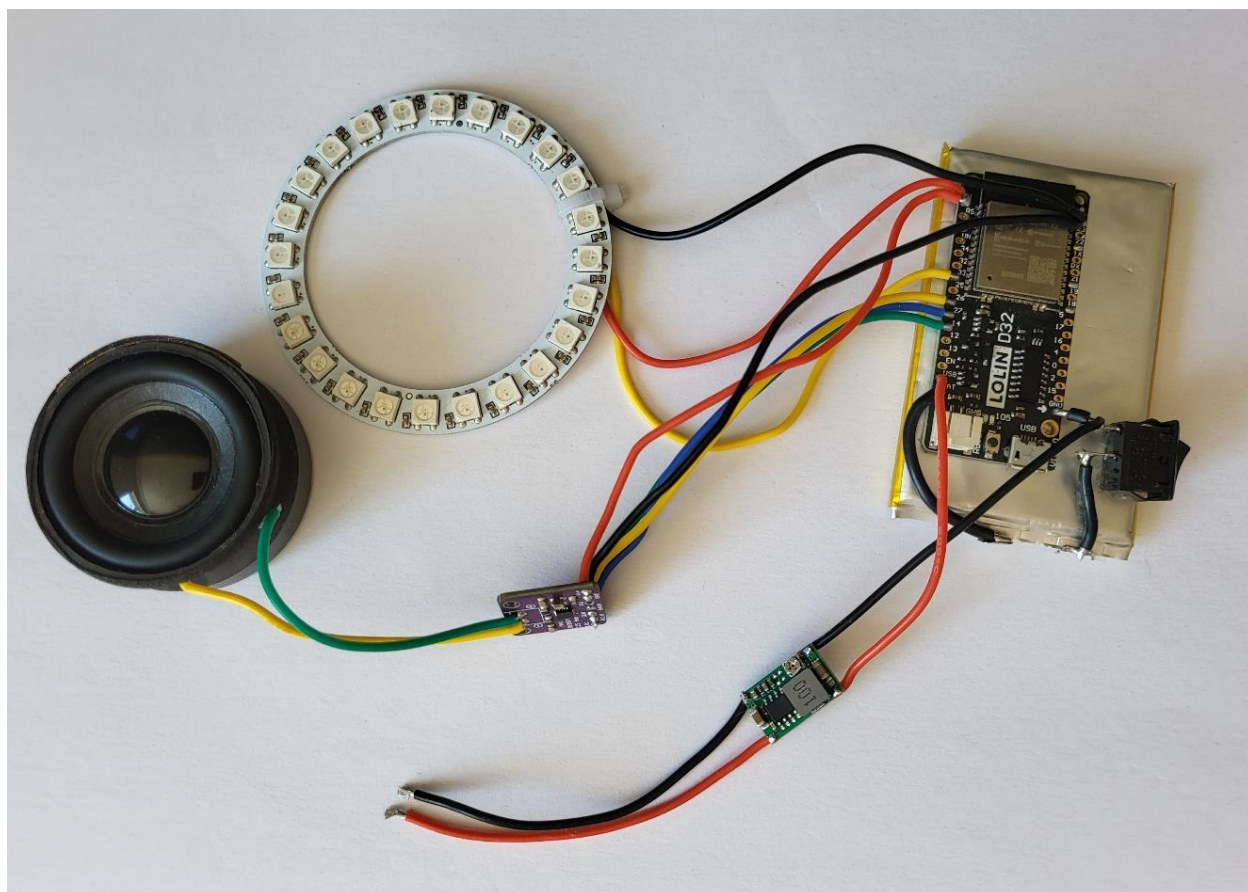


Рисунок 3.14 — Розроблена система для світлової та звукової індикації

Для реалізації звукового виходу було використано модуль цифрового аудіопідсилювача MAX98357, який підключено до плати LOLIN D32 за допомогою I2S-протоколу. Як навантаження застосовується динамік з номінальним опором 4 Ом та максимальною потужністю 5 Вт. Підключення підсилювача до мікроконтролера здійснено через такі контакти: LRC — підключено до GPIO14, BCLK — підключено до GPIO27, DIN — підключено до GPIO26. Ці піни обрані не випадково. У ESP32, зокрема на платі LOLIN D32, інтерфейс I2S є апаратно гнучким і дозволяє переназначення ліній на будь-які вільні GPIO-піни [23]. Ці піни не конфліктують із системними шинами, такими як UART, SPI чи внутрішній флеш, і не використовуються жодним іншим модулем у межах проєкту. До того ж, вони розташовані поруч на платі, що фізично спрощує монтаж і зменшує довжину сигнальних ліній це також знижує ймовірність виникнення високочастотних завад у цифровому аудіо.

Живлення LOLIN D32 здійснюється через стабілізатор Mini-360, який понижує вхідну напругу з 7,4 В (від двосекційного акумулятора Li-ion, що використовується для руху платформи) до стабільних 5 В. Ця напруга далі подається на вбудований лінійний стабілізатор на самій платі ESP32, який генерує 3,3 В для живлення ядра мікроконтролера та периферії. Додатково, до плати LOLIN D32 підключено окремий Li-ion акумулятор, що використовується для забезпечення автономної роботи мультимедійної частини системи. У випадку, якщо основний акумулятор роботи повністю розрядиться і енергоживлення виконавчих механізмів припиниться, плата LOLIN D32 все одно залишиться активною завдяки власному акумулятору. Це дозволяє продовжити роботу звукових повідомлень, сигналів тривоги або візуальних ефектів навіть після повної зупинки платформи.

Світлова індикація реалізована на основі кільцевої адресованої світлодіодної стрічки WS2812B, що поєднана з функцією аудіоаналізу в реальному часі. Керування цією стрічкою здійснюється шляхом перетворення Bluetooth аудіопотоку на візуальні ефекти відповідно до частотного спектра звуку.

Передача даних до WS2812B реалізована через цифровий пін GPIO33, який був обраний завдяки його повній сумісності з таймованим керуванням, необхідним для протоколу передачі сигналу до світлодіодів. GPIO33 підтримує стабільну роботу з високою швидкістю оновлення (800 кГц), яка є важливою для точного керування кольорами кожного пікселя в масиві. Щоб захистити мікроконтролер від потенційно надмірного струму навантаження, між піном GPIO33 та лінією керування стрічкою встановлено резистор номіналом 220 Ом. Цей резистор виконує кілька важливих функцій: обмежує струм, що протікає через вихідний пін мікроконтролера, запобігаючи короткочасним піковим перевантаженням; знижує ризик електричного зносу GPIO при частому перемиканні на високих частотах.

3.4 Організація зв'язку між Arduino Uno, ESP32-CAM та LOLIN D32

Зв'язок між контролерами був реалізований із урахуванням ролей кожного пристрою, обмежень по живленню та необхідної взаємодії. Основними керуючими

елементами виступають плата Arduino Uno, яка координує роботу двигунів і сенсорів для руху, та модуль ESP32-CAM, що відповідає за обробку та передавання зображень. Додаткову функцію візуально-звукової індикації виконує LOLIN D32, який при цьому працює автономно, без фізичного з'єднання з основною частиною системи.

Для обміну даними між Arduino Uno та ESP32-CAM використовується інтерфейс UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) [24]. Це класичний асинхронний протокол послідовної передачі, у якому відсутній загальний тактовий сигнал між пристроями. Передача інформації здійснюється побітово, в рамках чітко визначеного формату: кожне повідомлення починається зі стартового біта (логічний 0), за яким слідує біти даних (найчастіше 8), і завершується стоп-бітом (логічна 1) (рисунок 3.15). Напруга рівня сигналу, що передається між Arduino і ESP32-CAM, коливається в межах від 0 до 3,3 В.

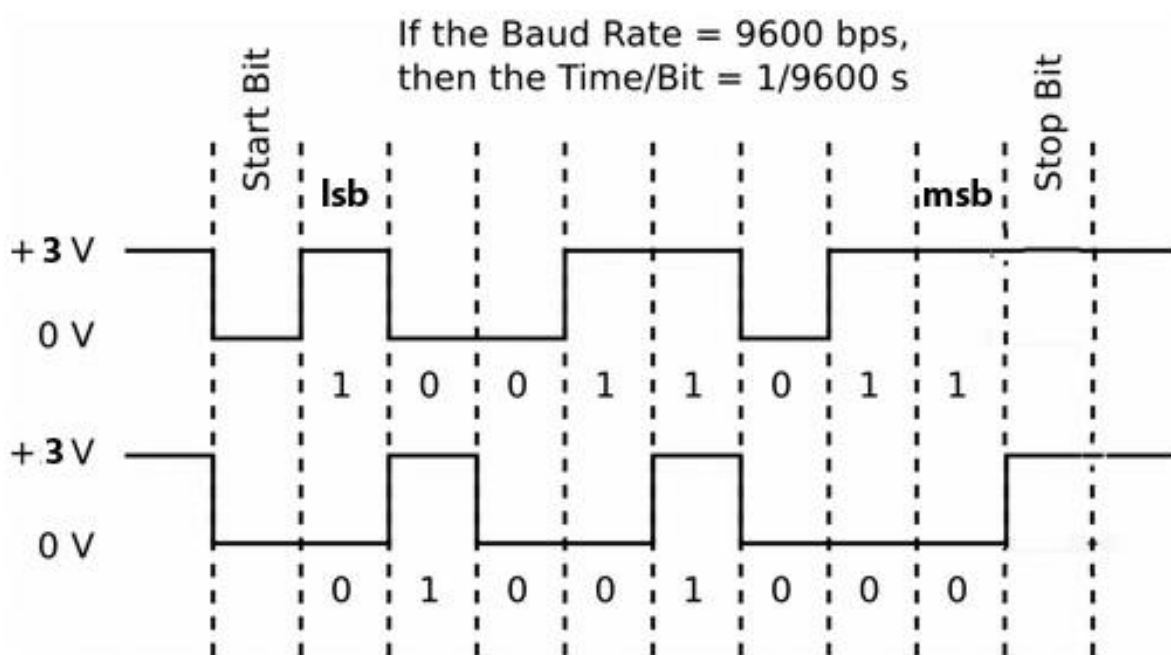


Рисунок 3.15 — Формат передачі даних за допомогою протоколу UART

У даній системі ESP32-CAM виступає центральною точкою прийому команд, які надходять із мобільного пристрою користувача через бездротове Wi-Fi-з'єднання або інший інтерфейс. Отримавши команду — наприклад, «рух вперед»,

«поворот ліворуч», «зупинка» — ESP32-CAM передає її через UART-порт до Arduino Uno. Той, у свою чергу, інтерпретує команду й активує відповідні виконавчі механізми: двигуни, серводвигуни чи інші елементи. Обмін даними відбувається на швидкості 9600 бод, що повністю задовольняє потреби системи, оскільки обсяг переданих команд невеликий. Такий рівень швидкості також забезпечує стабільну роботу без ризику втрат даних при коротких провідниках або доволі простій схемі з'єднання.

ESP32-CAM на відміну від звичайної ESP32, не має повноцінного USB-конвертера для безпосереднього підключення до комп'ютера. В процесі перепрошивки необхідно замкнути контакти IO0 та GND в роботі це реалізується перемикачем на платі розширення [25]. Переведення модуля в режим завантаження дозволяє успішно передати прошивку з Arduino IDE. Після завершення програмування перемикач повертається у вихідне положення, і модуль запускається у звичайному режимі виконання коду.

Щодо модуля LOLIN D32, то він фізично не підключений ані до Arduino Uno, ані до ESP32-CAM. Це рішення прийнято свідомо з кількох причин. По-перше, функціонал LOLIN D32 не вимагає обміну даними з іншими контролерами. Його головне завдання — реалізація світлової та звукової індикації на основі Bluetooth-аудіо, яке приймається безпосередньо з мобільного пристрою користувача. Модуль працює як Bluetooth приймач, аналізує аудіопотік у реальному часі, обробляє його алгоритмом Швидкого Перетворення Фур'є, після чого відображає результат на LED-стрічці, паралельно виводячи звук через аудіопідсилювач MAX98357.

4 ТЕСТУВАННЯ ТА МОДИФІКАЦІЯ СИСТЕМИ

4.1 Методика тестування системи

Тестування кіберфізичної системи — це обов'язковий етап перед тим, як вважати пристрій повністю придатним до використання. Навіть якщо система складена з типових, перевірених компонентів, важливо впевнитися, що всі її частини працюють не лише окремо, а й у зв'язці у реальному середовищі. Методика тестування має включати низку принципів і підходів, які дозволяють виявити як очевидні, так і приховані проблеми, а також забезпечити довготривалу стабільність роботи пристрою.

Найперше, що потрібно перевірити це функціональність: чи система взагалі виконує свої основні завдання. У цьому випадку йдеться про те, чи здатен роботизований комплекс пересуватися, реагувати на зміну навколишнього середовища, відстежувати лінії, обминати перешкоди, передавати зображення з камери та подавати відповідні світлові або звукові сигнали. Оцінка функціональності зазвичай відбувається у спрощених умовах — на рівній поверхні без сторонніх факторів. Це дозволяє протестувати кожен модуль окремо, переконатися у правильності підключення, логіки програми та реакції на задані команди.

Другий важливий момент це надійність роботи. Система може працювати правильно перші кілька хвилин, але згодом виявляються проблеми, пов'язані з перегріванням, нестабільним живленням, наводками чи помилками в логіці. Тому тестування проводиться впродовж тривалого часу. Робот має перебувати у ввімкненому стані з активними модулями та періодично виконувати типові дії. Важливо відстежити, чи не втрачається зв'язок між модулями, чи не зависають мікроконтролери, чи камера продовжує стабільно передавати відео, і чи система не починає поводитись неконтрольовано через помилки в програмному забезпеченні.

Також увагу слід приділити відгуку системи на зовнішні подразники. Наприклад, інфрачервоні датчики мають працювати в умовах різного освітлення, як при денному світлі, так і в затемненому приміщенні. Ультразвуковий датчик тестується на здатність розпізнавати об'єкти з різних матеріалів (пластик, тканина,

дерево), а також на коректну роботу при зміні відстані. Важливо, щоб система не лише розпізнавала перешкоди, а й вчасно на них реагувала.

Камера тестується не тільки з точки зору якості зображення, а й на затримку в передачі потоку, стабільність роботи при перемиканні між точками доступу Wi-Fi, а також здатність до передавання в реальному часі без "фризів" або зависань. Поворотний механізм камери також має перевірятись на плавність, точність та відсутність мертвих зон або заїдань у крайніх положеннях.

Тестування інтерактивності це те, як система реагує на команди користувача. Можливість керування через смартфон, запуск звукової індикації або віддалене перемикання режимів. Тут важливо протестувати не лише сам факт передачі команд, а й швидкість та точність реакції, відсутність конфліктів між різними режимами.

Під час тестування важливо дотримуватись системного підходу. Тобто не просто тестувати кожен елемент по черзі, а імітувати повноцінні сценарії роботи, максимально наближені до реальних умов. Якщо при цьому всі модулі працюють синхронно, без збоїв, а результат відповідає очікуванням, це свідчить про узгодженість елементів.

Ще один важливий принцип це повторюваність результатів. Якщо одна й та сама команда або ситуація призводить до одного й того самого результату в різні моменти часу це говорить про стабільність і передбачуваність роботи системи. Якщо ж реакція змінюється, значить є фактор нестабільності, який необхідно виявити й усунути.

4.2 Тестування кіберфізичної системи

4.2.1 Тестування руху

Першим етапом тестування була перевірка основної функції робота, його здатності самостійно пересуватись за заданою траєкторією (рисунки 4.1). Було запущено в режимі руху по лінії. Результати показали, що робот упевнено тримається смуги. При плавних поворотах він поводить себе стабільно, якщо ж поворот занадто різкий, робот автоматично зменшує швидкість і починає

обертатися покроково, щоб зберегти контроль і не втратити смугу. У випадках, коли він все ж таки втрачає лінію, спрацьовує резервний алгоритм: робот починає крутитися на місці, намагаючись знову знайти напрям руху і в більшості випадків це йому вдається досить швидко. Окремо було протестовано режим руху з керуванням від ультразвукового сенсора, завдяки якому робот може розпізнавати об'єкти попереду і змінювати траєкторію руху для обминання перешкод. Сенсор коректно реагує навіть на невеликі об'єкти, що робить його надійним для орієнтації в просторі.



Рисунок 4.1 — Результат перевірки придатності руху робота

4.2.2 Тестування світлової та звукової індикації

Під час тестування реалізованої системи звукової та світлової індикації було перевірено якість передачі аудіосигналу через Bluetooth, коректності його обробки та синхронності з виведенням світлових ефектів.

Регулювання гучності відбувається безпосередньо на смартфоні або іншому пристрої, який виступає джерелом звуку. Будь-які зміни гучності одразу ж впливають на інтенсивність освітлення, чим сильніший аудіосигнал, тим яскравіше загораються світлодіоди. Це створює ефект прямого зворотного зв'язку між звуком і світлом, роблячи індикацію живою та динамічною.

У ході прослуховування різних треків, як з насиченим басом, так і з плавними частотами спостерігалось, що система досить чітко розділяє частотні компоненти. Для зменшення впливу шуму на нижніх рівнях гучності перед обробкою амплітуд встановлюється поріг чутливості, що забезпечує чіткість та стабільність індикації без виникнення помилкових сигналів.

Світлодіодне кільце складається з 24 світлодіодів. Воно поділено на симетричні сегменти. Кожен елемент лівої частини відповідає відповідному елементу з правого боку (рисунок 4.2). Таким чином, коли на певній частоті з'являється значна амплітуда, загорається пара світлодіодів, розташована симетрично відносно вертикальної осі. Це створює візуальний баланс і підсилює ефект звукової хвилі, яка ніби розгортається назустріч з центру кільця.

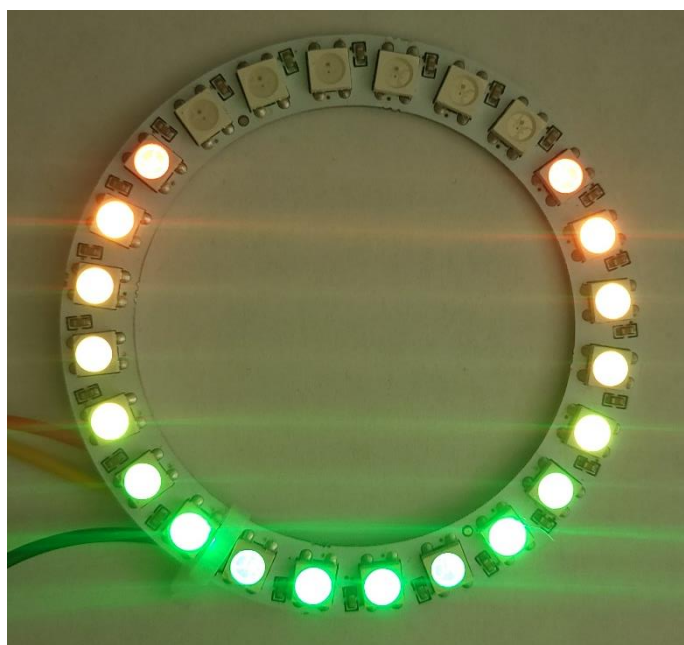


Рисунок 4.2 — Приклад виведення світлових ефектів

Кольори індикації змінюються залежно від частоти. Низькі частоти відображаються щеленим кольором. Середні частоти переходять у жовтий або помаранчевий. Високочастотні складові відображаються червоним. Відтінок підбирається з урахуванням частотної смуги кожного сегмента. Така реалізація дозволяє відразу зрозуміти які частоти домінують у звуці. Амплітуда звука впливає

на яскравість відповідних сегментів. Використовується згладжування значень, щоб уникнути надмірного мерехтіння, але при цьому передаються всі динамічні зміни. Під час тесту також помітно, що при зниженні гучності чи відтворенні мелодій з вузьким частотним діапазоном кількість активних світлодіодів зменшується, яскравість приглушується, що візуально збігається з характером відтвореного звуку.

Проведене тестування продемонструвало злагоджену роботу між виведенням аудіо сигналу, обробкою спектру й виведенням світлової індикації, розподіл по частотах і візуалізація працюють синхронно.

4.3 Виявлення недоліків і вдосконалення зібраного комплексу

На даному етапі система є повністю працездатною та виконує всі поставлені функції згідно з початковими вимогами. Всі ключові модулі Arduino Uno, ESP32-CAM, та LOLIN D32 стабільно взаємодіють у межах своїх завдань, забезпечуючи автономний рух, базову навігацію, передачу зображень, а також аудіо і світлову індикацію. Під час тестування не виявлено критичних помилок або несподіваних збоїв у роботі. Проте, незважаючи на досягнуту функціональність, у системи залишається потенціал для вдосконалення.

Одним із очевидніших шляхів вдосконалення є розширення підсистеми лінійної навігації шляхом збільшення кількості інфрачервоних датчиків для відстеження траєкторії. Поточна конфігурація використовує три датчики, що забезпечують базове розпізнавання лінії та дозволяють роботу рухатися вздовж неї, коригуючи напрям за допомогою простого порівняння сигналів лівого, правого та центрального сенсорів. Такий підхід працює ефективно на простих маршрутах, проте його можливості обмежені при проходженні складних поворотів, розгалужень або ділянок зі зношеною розміткою. Збільшення кількості сенсорів до п'яти або навіть семи дає змогу суттєво покращити точність позиціонування відносно лінії. Додаткові датчики дозволяють не лише точніше виявляти положення лінії, а й прогнозувати її напрямок ще до того, як відбудеться відхилення. Такий підхід

може забезпечити плавні переходи між поворотами, уникнути коливань або різких маневрів.

Ще одним важливим напрямком вдосконалення є збільшення ємності акумулятора. У поточній конфігурації використовується двосекційний Li-ion акумулятор 18650 із загальною напругою близько 7,4 В, що понижується стабілізаторами до робочих 5 В. Цього вистачає для середньої тривалості роботи, але активне використання двигунів, Wi-Fi, Bluetooth, підсвічування WS2812B та аудіопідсилювача створює суттєве навантаження. Додавання ще двох елементів 18650, з'єднаних паралельно з уже наявними, дало б змогу збільшити ємність акумулятора майже вдвічі, зберігаючи при цьому ту саму робочу напругу. Це б сильно вплинуло на автономність системи.

Хоча поточна версія пристрою повністю відповідає базовим вимогам і є стабільною, існує певний потенціал для її розвитку як у бік функціонального розширення, так і в напрямку зростання надійності та автономності. Це дозволяє використовувати зібрану платформу не лише як навчальний приклад, а й як основу для більш складних кіберфізичних систем.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання комплексної бакалаврської кваліфікаційної роботи було реалізовано апаратну частину автономної навігаційної системи з підтримкою маркерного орієнтування. На основі аналізу сучасних підходів до роботизованої навігації обґрунтовано доцільність використання оптичних маркерів як ефективного рішення для трекового слідування в умовах обмеженого бюджету.

Було підібрано та інтегровано апаратні компоненти, серед яких — мікроконтролери Arduino Uno, ESP32-CAM та LoLin D32, а також допоміжні модулі для аудіо та світлової індикації. Розроблено схему підключення елементів та забезпечено їхню узгоджену взаємодію.

Важливим етапом стала фізична реалізація системи на основі обраної платформи, що дозволило перейти до етапу тестування. У ході тестування було перевірено коректність роботи виконавчих механізмів, каналів зв'язку, а також індикаційних модулів. Результати тестування підтвердили працездатність комплексу та відповідність поставленим вимогам.

У ході виконання комплексної бакалаврської кваліфікаційної роботи усі завдання, визначені метою, були успішно реалізовані. Отримані результати можуть бути використані в навчальних і дослідницьких цілях, зокрема при проектуванні бюджетних кіберфізичних систем. Структура системи залишає можливості для подальшої модифікації, розширення функціоналу та адаптації під інші задачі мобільної робототехніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Як працюють кіберфізичні системи? URL: <https://robotdreams.cc/uk/blog/649-how-do-cyber-physical-systems-work-and-why-are-they-needed> (дата звернення 01.05.2025).88
2. Smart Grids: A Cyber—Physical Systems Perspective. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7433937/> (дата звернення 01.05.2025).
3. Fiducial Markers and Particle Filter Based Localization. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-024-03090-y> (дата звернення 01.05.2025).
4. The line follower robot: a meta-analytic approach. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11935780/> (дата звернення 02.05.2025).
5. IR Sensor | Basics, Types, Circuit, Working, Projects, FAQs. URL: <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/ir-led-infrared-sensor-basics> (дата звернення 02.05.2025).888
6. ArUco Markers for Precise Pose Tracking in Robotics. URL: <https://www.hackster.io/William0001/aruco-markers-for-precise-pose-tracking-in-robotics-8963fb> (дата звернення 03.05.2025).
7. Magnetic Guide Sensor with Angle Measurement Enhances Mobile Robots Path Following. URL: <https://www.roboticstomorrow.com/news/2024/09/17/magnetic-guide-sensor-with-angle-measurement-enhances-mobile-robots-path-following/23181/> (дата звернення 03.05.2025).
8. Is Arduino Used In Robotics? URL: <https://mp.moonpreneur.com/blog/arduino-used-in-robotics/> (дата звернення 04.05.2025).
9. Wemos LOLIN D32 Pro — RIOT 0.1.1 documentation. URL: https://riot-os.readthedocs.io/generated/group/group__boards__esp32__wemos-lolin-d32-pro.html (дата звернення 04.05.2025).
10. All about ESP32 Camera Module. URL: <https://robocraze.com/blogs/post/all-about-esp32-camera-module> (дата звернення 05.05.2025).

11. The Role of Service Robots Display. URL: <https://www.rocktech.com.hk/rocktech-blog/service-robot-display/> (дата звернення 05.05.2025).
12. Tactile Sensing in Robots: An Introduction. URL: <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=32> (дата звернення 05.05.2025).
13. Virtual and Augmented Reality in Everyday Life. URL: <https://grupogiga.com/blog/virtual-and-augmented-reality-in-everyday-life/> (дата звернення 06.05.2025).
14. What is Amazon Robotic Fulfillment Center? URL: <https://www.waredock.com/magazine/what-is-amazon-robotic-fulfillment-center/> (дата звернення 06.05.2025).
15. T3 Autonomous Mobile Robot. URL: <https://aethon.com/t3/> (дата звернення 07.05.2025).
16. Starship Technologies. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Starship_Technologies (дата звернення 06.05.2025).
17. Introduction to ATmega328. URL: <https://www.theengineeringprojects.com/2017/08/introduction-to-atmega328.html> (дата звернення 07.05.2025).
18. ESP32 Camera and OV2640 Sensor Documentation. URL: <https://matchboxscope.github.io/docs/Hardware/ESP32Cam/> (дата звернення 08.05.2025).
19. ESP32 CAM Pinout Reference. URL: <https://lastminuteengineers.com/esp32-cam-pinout-reference/> (дата звернення 08.05.2025).
20. LOLIN D32 Development Board Details, Pinout, Specs. URL: <https://www.espboards.dev/esp32/d32/> (дата звернення 09.05.2025).
21. Модуль аудіопідсилювача моно 3Вт класу D на MAX98357. URL: <https://arduino.ua/prod4112-modyl-aydioysilatelya-mono-3vt-klasya-d-na-max98357> (дата звернення 09.05.2025).
22. Controlling WS2812B Addressable LEDs with Arduino. URL: <https://lastminuteengineers.com/ws2812b-arduino-tutorial/> (дата звернення 09.05.2025).

23. ELEGOO Smart Robot Car Kit V4.0 Tutorial. URL: https://www.elegoo.com/blogs/arduino-projects/elegoo-smart-robot-car-kit-v4-0-tutorial?_pos=1&_sid=a1dca270f&_ss=r (дата звернення 09.05.2025).

24. I²S. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2S> (дата звернення 10.05.2025).

25. Universal asynchronous receiver transmitter. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_asynchronous_receiver-transmitter (дата звернення 10.05.2025).

26. ESP32 Cam code upload using Arduino Uno. URL: <https://iotstarters.com/esp32-cam-code-upload-using-arduino-uno/> (дата звернення 10.05.2025).

ДОДАТОК А

Технічне завдання

Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

Кафедра обчислювальної техніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ОТ

проф., д.т.н.. Азаров О.Д.

«21» березня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання комплексної бакалаврської кваліфікаційної роботи

«Кіберфізичний комплекс для автономної навігації з використанням маркерів

Частина 1. Апаратне забезпечення»

08-54.КБКР.041.00.000.ТЗ

Науковий керівник: доцент к.т.н.

_____ Богомолів С. В.

Студент групи 2СП-216

_____ Черневський Н. О.

1 Підставою для виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)

1.1 Актуальність дослідження обумовлена зростаючим попитом на прості та бюджетні рішення автономної навігації. Існуючі системи потребують складного налаштування, дорогих сенсорів або спеціалізованого обладнання. Реалізація навігації на основі інфрачервоних та ультразвукових датчиків з використанням маркерів, недорогих мікроконтролерів дає змогу створювати надійні та працездатні системи. Це дозволяє розвивати напрямки робототехніки, інтернету речей та автоматизації, роблячи сучасні технології більш доступними;

1.2 Наказ про затвердження теми БКР.

2 Мета БКР і призначення розробки

2.1 Мета роботи — аналіз існуючих рішень та вибір оптимальних компонентів для побудови апаратної частини мобільної кіберфізичної системи, здатної здійснювати автономне переміщення за маркерами

2.2 Призначення розробки — створена система призначена для експериментального або навчального застосування у сфері робототехніки. З можливістю демонстрації принципів трекової навігації, обробки сигналів від інфрачервоних і ультразвукових сенсорів та взаємодії між мікроконтролерними пристроями.

3 Вихідні дані для виконання БКР

3.1 Дослідження сучасних методів конструювання мобільних роботизованих систем та аналіз технологій маркерної навігації;

3.2 Розробка структурної та функціональної схеми програмно-апаратного комплексу на основі мікроконтролерів Arduino Uno, LoLin D32 та ESP32-CAM з урахуванням підключення сенсорів та виконавчих механізмів;

3.3 Фізичне складання системи з окремих апаратних компонентів;

3.4 Підключення електричних з'єднань відповідно до розробленої схеми, організація живлення модулів, підключення комунікаційних інтерфейсів;

3.5 Проведення тестування всіх підсистем та внесення необхідних змін до апаратної частини для підвищення стабільності й функціональності системи.

4 Вимоги до виконання БКР

Головна вимога — є реалізація надійного апаратного комплексу для автономного пересування мобільного робота з використанням маркерної навігації.

5 Етапи БКР та очікувані результати

Етапи роботи та очікувані результати приведено в Таблиці А.1.

Таблиця А.1 — Етапи БКР

№ етапу	Назва етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	Постановка задачі роботи	21.03.25	21.03.25	Технічне завдання
2	Аналіз предметної області та технологій	21.03.25	30.03.25	Розділ 1
3	Вибір елементної бази та розробка кіберфізичної системи	21.03.25	30.04.25	Розділ 2
4	Компонування елементів кіберфізичної системи	31.03.25	13.04.25	Розділ 3
5	Тестування та модифікація системи	14.04.25	27.04.25	Розділ 4
6	Оформлення пояснювальної записки	28.04.25	11.05.25	ПЗ, графіч. матеріал і презентація
7	Перевірка якості виконання комплексної бакалаврської кваліфікаційної роботи та усунення недоліків	13.05.25	13.05.25	Оформлені документи

6 Матеріали, що подаються до захисту БКР

До захисту подаються: пояснювальна записка КБКР, графічні і ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту КБКР на кафедрі, відгук наукового

керівника, відгук опонента, протоколи складання державних екзаменів, анотації до КБКР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення КБКР діючим вимогам.

7 Порядок контролю виконання та захисту БКР

Виконання етапів графічної та розрахункової документації БКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист БКР відбувається на засіданні Екзаменаційної комісії, затвердженої наказом ректора.

8 Вимоги до оформлювання та порядок виконання БКР

8.1 При оформлювання БКР використовуються:

- ДСТУ 3008: 2015 «Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання»;

- ДСТУ 8302: 2015 «Бібліографічні посилання. Загальні положення та правила складання»;

- міждержавний ГОСТ 2.104-2006 «Єдина система конструкторської документації. Основні написи»;

- методичні вказівки до виконання бакалаврських кваліфікаційних робіт зі спеціальності 123 — «Комп'ютерна інженерія» (освітня програма «Системне програмування»). Кафедра обчислювальної техніки ВНТУ 2022;

- документами на які посилаються у вище вказаних.

8.2 Порядок виконання КБКР викладено в «Положення про кваліфікаційні роботи на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:21».

ДОДАТОК В
Графічна частина

**КІБЕРФІЗИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ З
ВИКОРИСТАННЯМ МАРКЕРІВ
ЧАСТИНА 1. АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

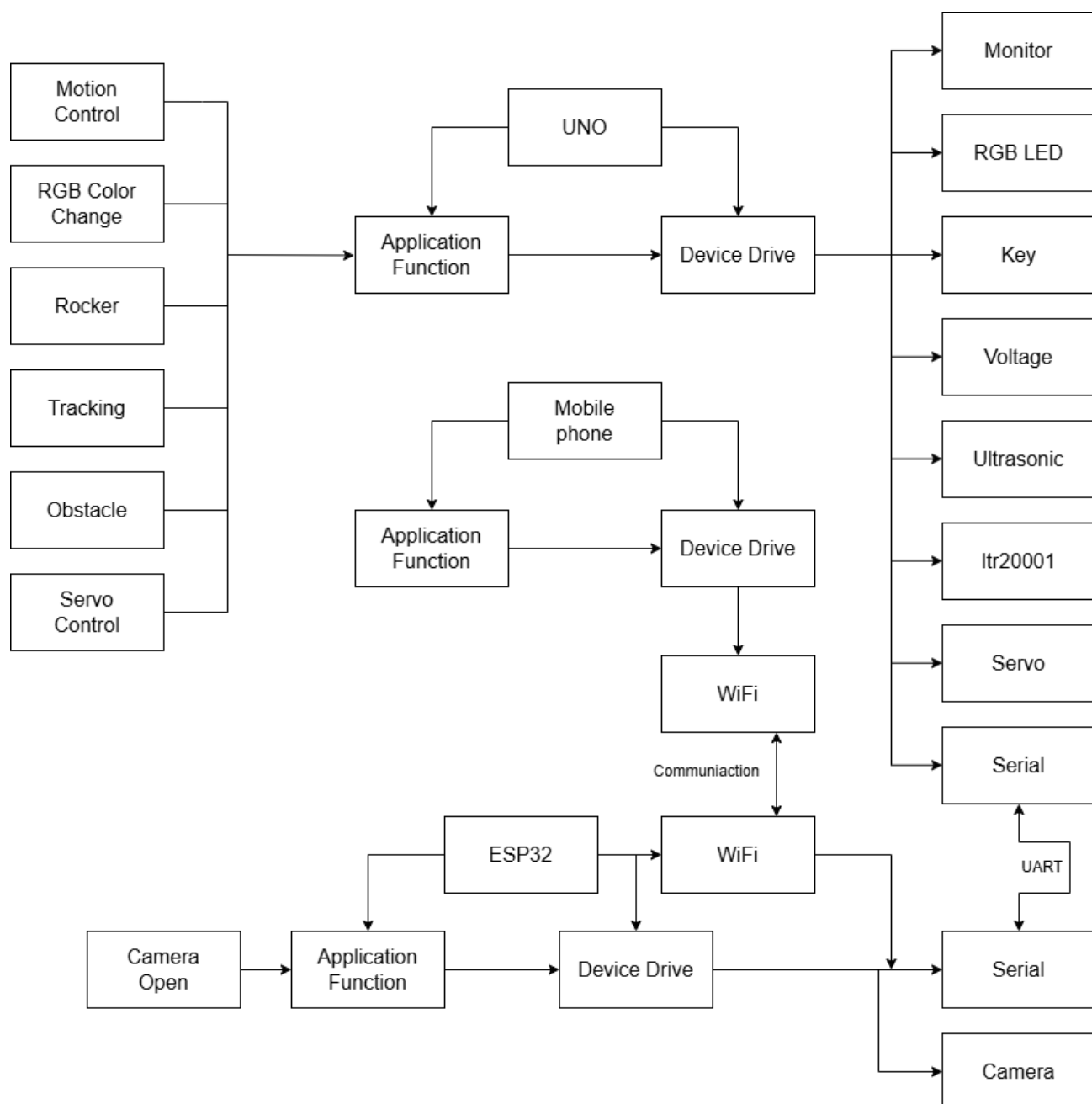


Рисунок Б.1 — Структурна схема роботизованого комплексу

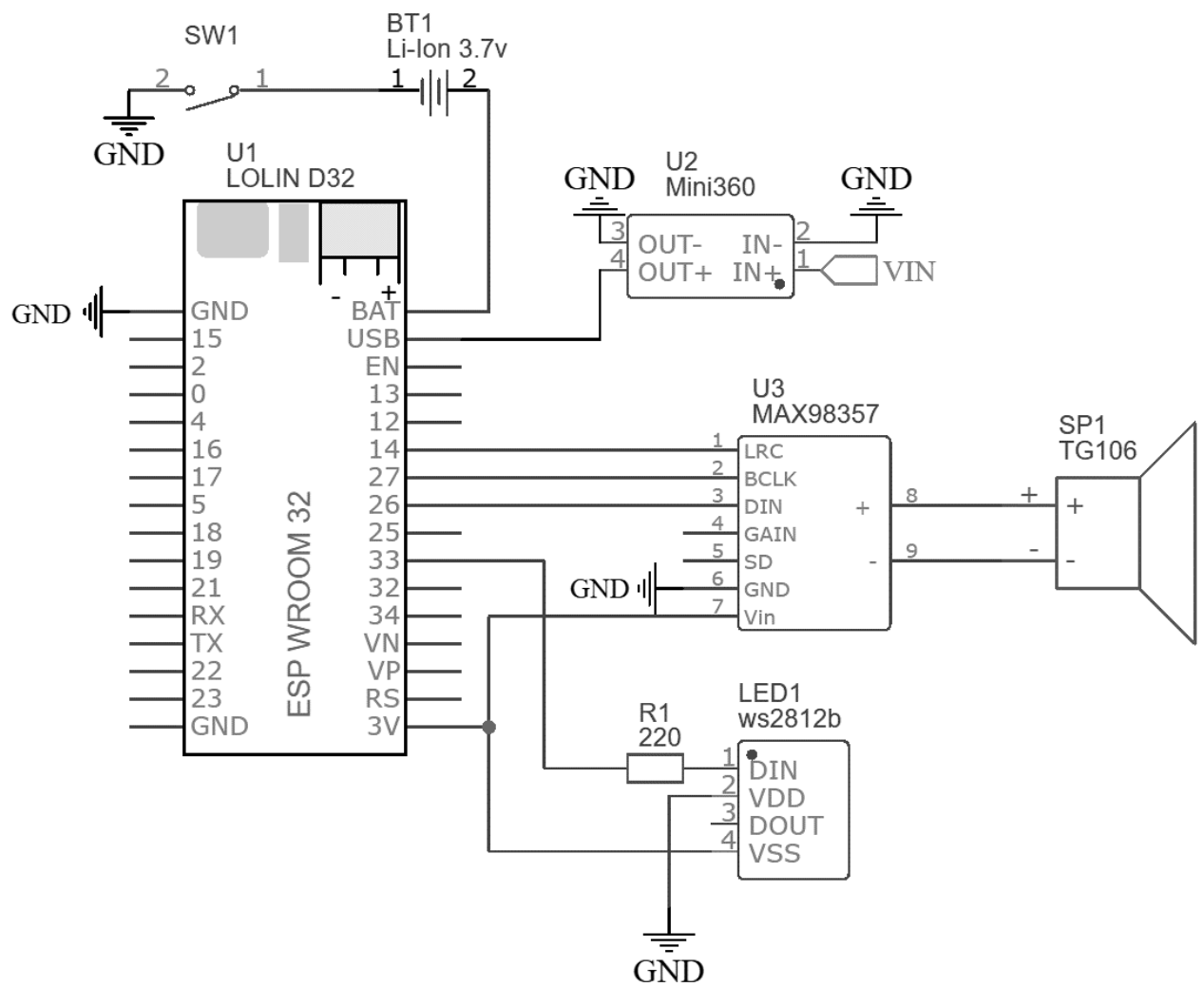


Рисунок Б.2 — Схема електрична принципова підсистеми звукової та світлової індикації

ДОДАТОК Г

Ілюстративна частина

КІБЕРФІЗИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МАРКЕРІВ ЧАСТИНА 1. АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ



Рисунок В.1 — Ілюстрація руху робота

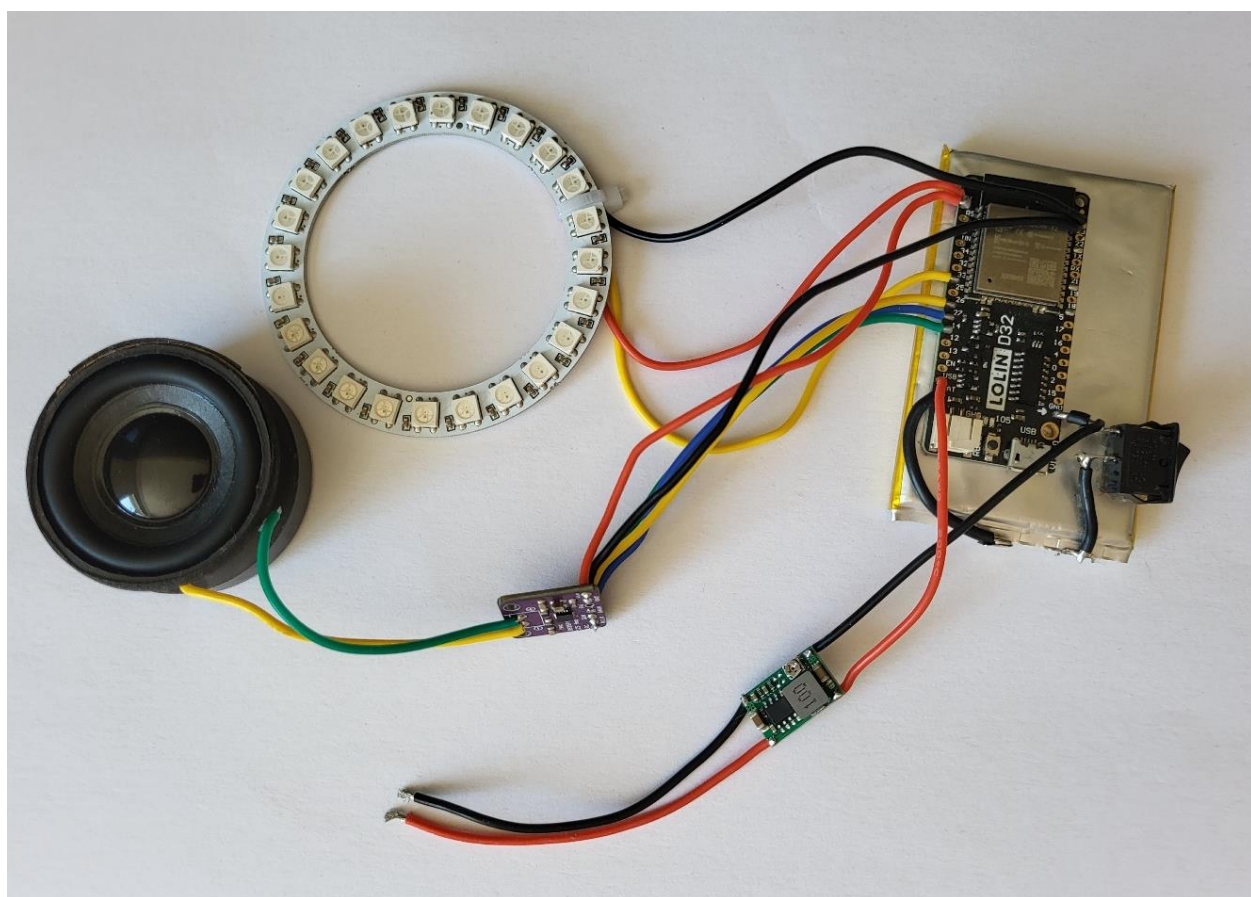


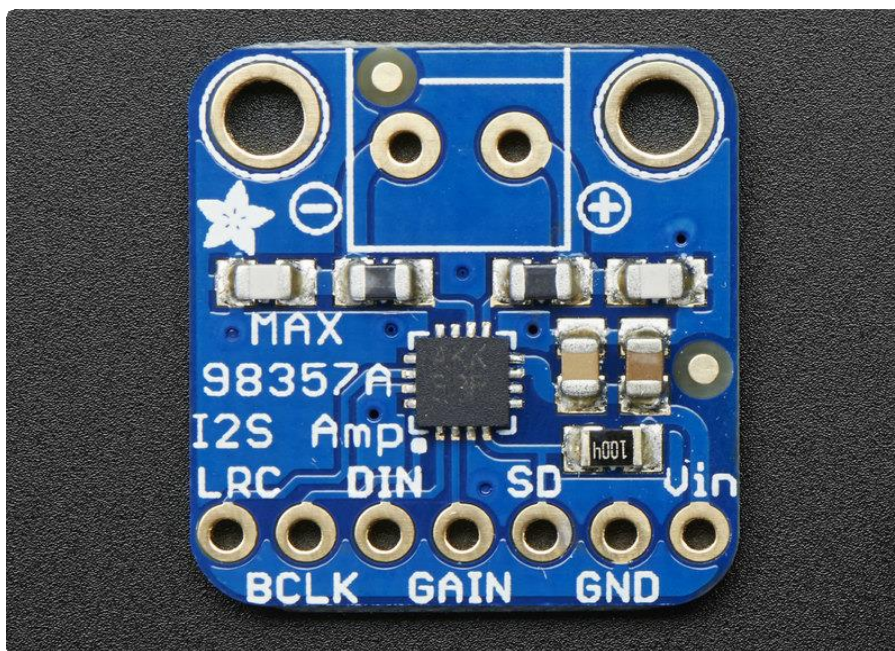
Рисунок В.2 — Розроблена система для світлової та звукової індикації

ДОДАТОК Д

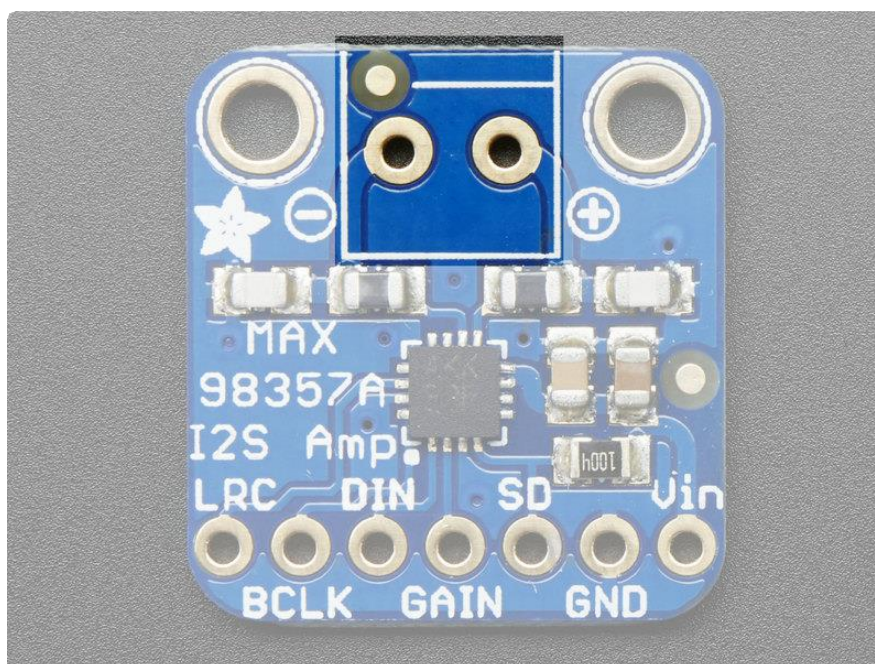
(довідниковий)

Документація на модуль MAX98357

Pinouts



The MAX98357A is an I2S amplifier - it does not use analog inputs, it only has digital audio input support! Don't confuse I2S with I2C, I2S is a sound protocol whereas I2C is for small amounts of data. Speaker Output



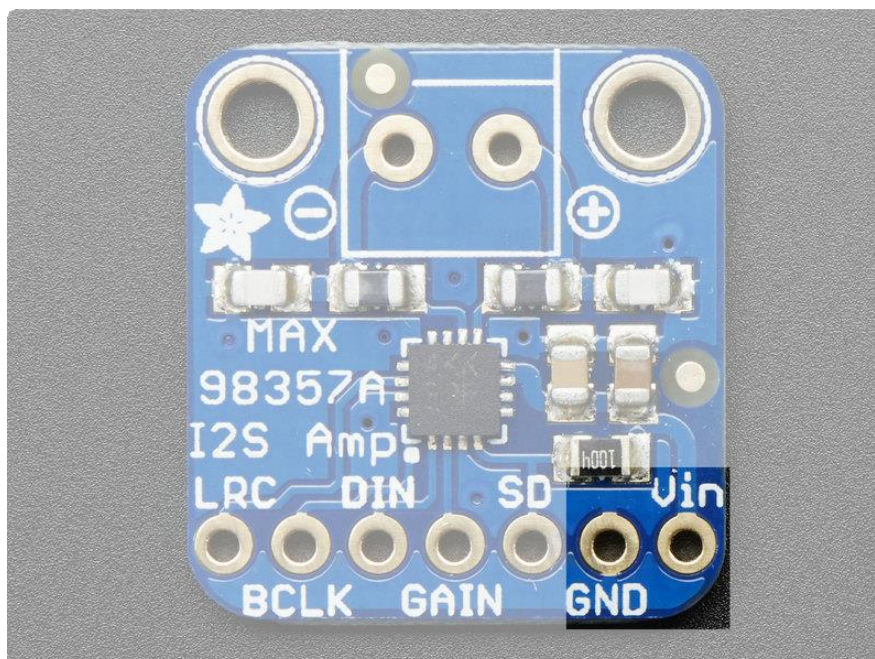
This amplifier is designed to drive moving coil loudspeakers only. Speaker impedance must be 4Ω or more. The output signal is a 330KHz PWM square wave with a duty cycle proportional to the audio signal. The inductance of the speaker coil serves as a low-pass filter to average out the high-frequency components. Do not try to use this as a pre-amplifier.

The outputs of *each channel* are "Bridge-Tied" with no connection to ground. This means that for each channels, the + and - alternate polarity to create a single channel amplifier with twice the available power.

Connect your speakers using the 3.5mm screw-terminal blocks.

- 5V into 4Ω @ 10% THD - 3W max
 - 5V into 4Ω @ 1% THD - 2.5W max
 - 3.3V into 4Ω @ 10% THD - 1.3W max
 - 3.3V into 4Ω @ 1% THD - 1.0W max
-
- 5V into 8Ω @ 10% THD - 1.8W max
 - 5V into 8Ω @ 1% THD - 1.4W max
 - 3.3V into 8Ω @ 10% THD - 0.8W max
 - 3.3V into 8Ω @ 1% THD - 0.6W max

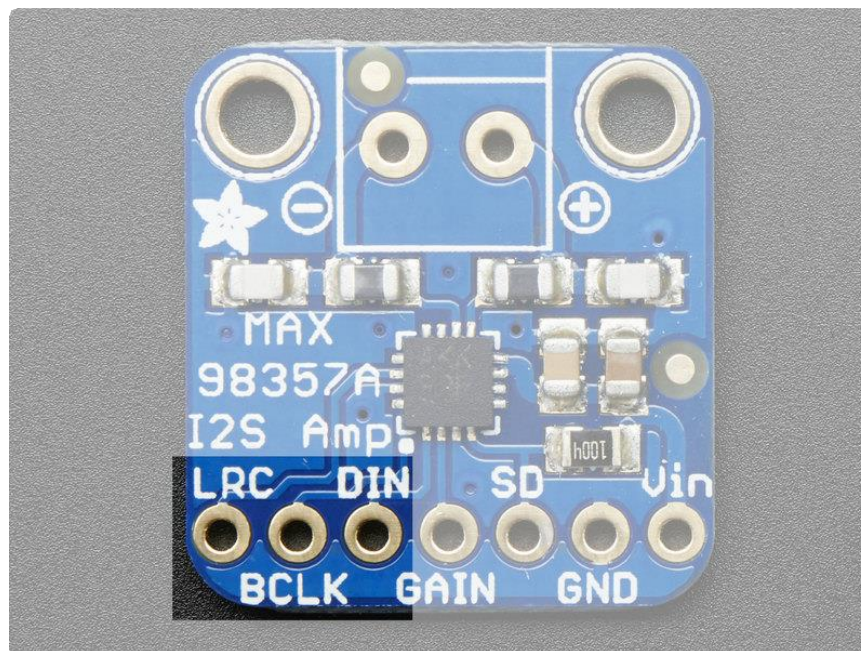
Power Pins



This is the power for the amplifier and logic of the amplifier. You can provide 2.5V up to 5.5V. Note that at 5V you can end up putting up to 2.8W into your speaker, so make sure your power supply can easily handle up to 650mA and we recommend a power supply spec'd for at least 800mA to give yourself some 'room'

If you have a 3.3V logic device, you can still power the amp from 5V, and that's recommended to get the most power output!

I2S Pins

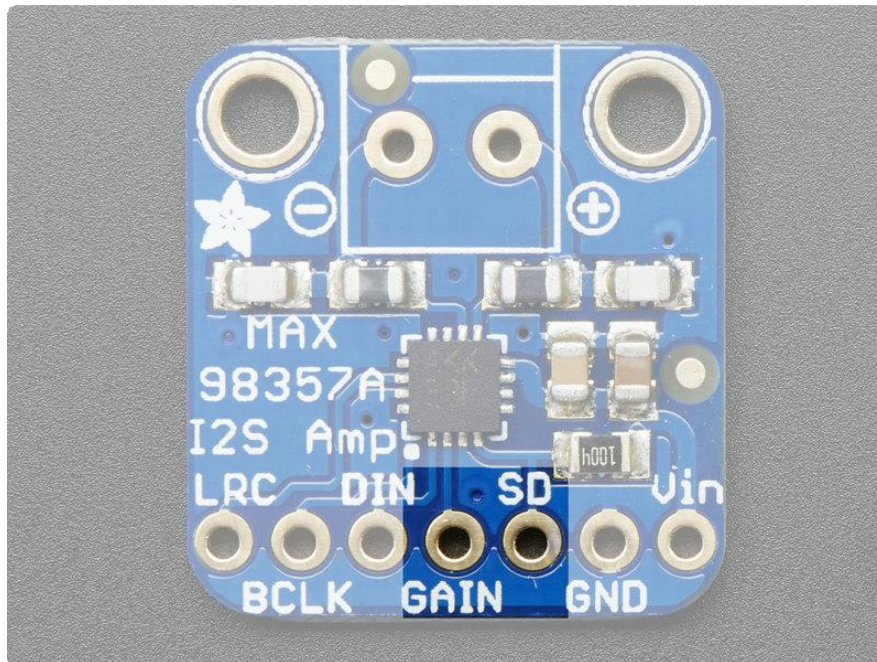


Three pins are used to receive audio data. These can be 3.3-5V logic

- LRC (Left/Right Clock) - this is the pin that tells the amplifier when the data is for the left channel and when its for the right channel
- BCLK (Bit Clock) - This is the pin that tells the amplifier when to read data on the data pin.
- DIN (Data In) - This is the pin that has the actual data coming in, both left and right data are sent on this pin, the LRC pin indicates when left or right is being transmitted

Note that this amplifier does not require an MCLK pin, if you have an MCLK output, you can leave it disconnected!

Other Pins



The other settings are handled by GAIN and SD
Gain

GAIN is, well, the gain setting. You can have a gain of 3dB, 6dB, 9dB, 12dB or 15dB.

- 15dB if a 100K resistor is connected between GAIN and GND
- 12dB if GAIN is connected directly to GND
- 9dB if GAIN is not connected to anything (this is the default)
- 6dB if GAIN is connected directly to Vin
- 3dB if a 100K resistor is connected between GAIN and Vin

This way, the default gain is 9dB but you can easily change it by tweaking the connection to the GAIN pin. Note you may need to perform a power reset to adjust the gain.

SD / MODE

This pin is used for shutdown mode but is *also* used for setting which channel is output. It's a little confusing but essentially:

- If SD is connected to ground directly (voltage is under 0.16V) then the amp is shut down
- If the voltage on SD is between 0.16V and 0.77V then the output is (Left + Right)/ 2, that is the stereo average.
- If the voltage on SD is between 0.77V and 1.4V then the output is just the Right channel

- If the voltage on SD is higher than 1.4V then the output is the Left channel.

This is compounded by an *internal* 100K pulldown resistor on SD so you need to use a pullup resistor on SD to balance out the 100K internal pulldown.

For the breakout board, there's a 1Mohm resistor from SD to Vin which, when powering from 5V will give you the 'stereo average' output. If you want left or right channel only, or if you are powering from non-5V power, you may need to experiment with different resistors to get the desired voltage on SD