

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

« ____ » _____ 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: « Системи автоматичного моніторингу дистанції для мобільних платформ»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК-21

Глущенко Олександр Вячеславович _____

Керівник:

доцент, к.т.н.

Богдан Галина Анатоліївна _____

Рецензент:

доцент, к.т.н.

Маркін Максим Олександрович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
1	A4	ДП ПК-21.04.1760.00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	83	
2	A1	ДП ПК-21.04.1760.00.001 Е1	Схема структурна	1	
3	A1	ДП ПК-21.04.1760.00.002 Е2	Схема функціональна	1	
4	A1	ДП ПК-21.04.1760.00.003 Е3	Схема електрично принципова	1	
5	A1	ДП ПК-21.04.1760.00.004 СхА	Блок-схема алгоритму роботи системи	1	
6	A1	ДП ПК-21.04.1760.00.005	Плакат	1	
7	A1	ДП ПК-21.04.1760.00.006	Рознесений вигляд	1	

				ДП ПК01.210315.000		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробник	Глуценко О.В.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівник	Богдан Г.А.				1	1
Консульт.					КПП ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-21	
Н/контр.						
Зав. каф.	Киричук Ю.В.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: « СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ
ДИСТАНЦІЇ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМ »**

Київ – 2026 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Глущенко Олександр Вячеславович

1. Тема роботи « Системи автоматичного моніторингу дистанції для мобільних платформ », керівник роботи Богдан Галина Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «28» травня 2024 р. №2121-с

2. Термін подання студентом проєкту

3. Вихідні дані до проєкту: Системи автоматичного моніторингу дистанції для мобільних платформ.

4. Зміст пояснювальної записки

1. Вступ
2. Аналітичний огляд
3. Огляд систем моніторингу дистанції
4. Розробка робоплатформи із автоматичним моніторингом дистанції
5. Висновки
6. Список використаних джерел

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) 4 креслиників 2 плакати

- 1 – Схема структурна
- 2 – Схема електрична функціональна
- 3 – Схема електрична принципова
- 4 – Алгоритм роботи системи
- 5 – Плакат
- 6 – Рознесений вигляд

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	12.02.2026	
2	Проведення аналітичного огляду	18.03.2026	
3	Розробка робоплатформи із автоматичним моніторингом дистанції	10.05.2026	
4	Розробка алгоритму роботи	28.05.2026	
5	Розробка креслеників	01.06.2026	

Студент

Олександр ГЛУЩЕНКО

Керівник

Галина БОГДАН

Анотація

Глущенко О. В. Системи автоматичного моніторингу дистанції для мобільних платформ.

Дипломний проєкт на здобуття ступеня бакалавра за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Факультет робототехніки та приладобудування, Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю, Київ, 2026.

Дипломний проєкт присвячений розробці, апаратній та програмній реалізації, а також експериментальному дослідженню комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного контролю відстані та безпечного позиціонування мобільних робототехнічних платформ ближнього радіуса дії.

Об'єкт дослідження – процеси вимірювання просторових параметрів, фільтрації сенсорних даних та автоматичного керування рухом мобільної платформи в реальному часі.

Предмет дослідження – методи, алгоритми, апаратні та програмні засоби для ультразвукової локації перешкод, адаптивного регулювання швидкості приводів та бездротової взаємодії з користувачем.

У роботі проведено детальний аналіз сучасних технологій моніторингу дистанції (лідари, радари, ультразвукові та оптичні системи) та обґрунтовано вибір компонентної бази. Розроблено та практично реалізовано діючий прототип мобільної платформи «Gelik 2.0» на базі мікроконтролера ESP32-S3 та ультразвукового сенсора HC-SR04. Спроековано силовий блок керування на базі драйверів TB6612FNG, систему інтелектуального світлодіодного освітлення та автономного живлення.

Програмне забезпечення, розроблене в середовищі Arduino IDE, базується на неблокуючій архітектурі із застосуванням системних таймерів. Реалізовано

оригінальний алгоритм адаптивного сповільнення платформи методом лінійної інтерполяції ШІМ-сигналу при наближенні до перешкоди в діапазоні від 60 до 5 см, а також трирівневу систему акустичного супроводу маневру. Створено кросплатформовий вебінтерфейс за принципом Single Page Application (SPA) на базі асинхронних Fetch API запитів для дистанційного моніторингу та керування платформою в реальному часі.

Натурні експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність системи: при цільовому програмному порозі зупинки двигунів у 5.0 см середня фактична відстань до перешкоди становила 5.13 см. Середня систематична похибка позиціонування склала всього 1.3 мм, а середнєквadraticне відхилення – 1.42 мм при середній затримці бездротового тракту 28.1 мс, що доводить високу завадостійкість та повторюваність результатів розробленої системи автоматизації.

Ключові слова: МОБІЛЬНА ПЛАТФОРМА, МОНІТОРИНГ ДИСТАНЦІЇ, ESP32-S3, HC-SR04, АДАПТИВНЕ СПОВІЛЬНЕННЯ, ШІМ-РЕГУЛЮВАННЯ, ВЕБ-ІНТЕРФЕЙС, АВТОПАРКОВКА, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ СИСТЕМИ.

Annotation

Hlushchenko O. V. Automatic distance monitoring systems for mobile platforms. Bachelor's diploma project in Specialty 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Faculty of Robotics and Power Engineering, Department of Automation and Non-Destructive Testing Systems, Kyiv, 2026.

The diploma project is dedicated to the design, hardware and software implementation, and experimental evaluation of a computer-integrated system for automatic distance control and safe positioning of short-range mobile robotic platforms.

The object of research is the processes of spatial parameter measurement, sensor data filtering, and real-time motion control of a mobile platform.

The subject of research is the methods, algorithms, hardware, and software tools for ultrasonic obstacle location, adaptive drive speed regulation, and wireless user interaction.

The work provides a comprehensive analysis of modern distance monitoring technologies (LiDAR, radar, ultrasonic, and optical systems) and justifies the choice of the component base. A functional prototype of the mobile platform "Gelik 2.0" based on the ESP32-S3 microcontroller and the HC-SR04 ultrasonic sensor was developed and practically implemented. A power control unit using TB6612FNG drivers, an intelligent LED lighting system, and an autonomous power supply were designed.

The software, developed in the Arduino IDE environment, utilizes a non-blocking architecture driven by system timers. An original algorithm for adaptive platform deceleration using linear interpolation of the PWM signal when approaching an obstacle in the range of 60 to 5 cm, along with a three-level acoustic maneuver support system, was implemented. A cross-platform web interface based on the Single Page Application (SPA) principle using asynchronous Fetch API requests was created for real-time remote monitoring and control.

Full-scale experimental tests confirmed the high efficiency of the system: with a target software engine stop threshold set at 5.0 cm, the average actual distance to the obstacle was 5.13 cm. The average systematic positioning error was only 1.3 mm, and the standard deviation was 1.42 mm, with an average wireless latency of 28.1 ms. This proves the high noise immunity and repeatability of the developed automation system.

Keywords: MOBILE PLATFORM, DISTANCE MONITORING, ESP32-S3, HC-SR04, ADAPTIVE DECELERATION, PWM REGULATION, WEB INTERFACE, AUTOMATIC PARKING, COMPUTER-INTEGRATED SYSTEMS.

Зміст

ВСТУП	13
РОЗДІЛ І АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ДИСТАНЦІЇ	14
1.1. Поняття мобільних платформ та їх застосування.....	14
1.2. Основні задачі контролю дистанції в мобільних системах	15
1.3 Огляд існуючих технологій вимірювання відстані	17
1.4 Порівняльний аналіз сучасних рішень.....	19
1.4.1 Навчальні робототехнічні платформи	20
1.4.2 Роботи на базі одноплатних комп'ютерів	21
1.4.3 Промислові автономні мобільні роботи	22
1.5 Недоліки існуючих систем	23
1.5.1 Обмеження сенсорних технологій	23
1.5.2 Обмеження апаратної реалізації.....	24
1.5.3 Обмеження програмних алгоритмів	26
1.6. Технічне завдання на проєкт	27
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	30
РОЗДІЛ 2 Технології та сенсори вимірювання дистанції.....	31
2.1 Ультразвукові датчики відстані.....	31
2.1.1 Фізичний принцип роботи	32
2.1.2 Типи ультразвукових датчиків та їх характеристики	34
2.1.3 Взаємодія з навколишнім середовищем та фактори впливу на точність	36
2.1.4 Переваги та недоліки ультразвукових датчиків	37
2.1.5 Інтеграція у мікроконтролерні системи та програмна реалізація.....	38

2.2 Лазерні та LiDAR-сенсори	38
2.2.1 Фізичний принцип роботи лазерних сенсорів	39
2.2.2 Типи лазерних сенсорів та систем LiDAR	41
2.2.3 Порівняльні характеристики лазерних сенсорів.....	42
2.2.4 Переваги та недоліки лазерних сенсорів	43
2.2.5 Застосування лазерних сенсорів у мобільній робототехніці.....	44
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	45
РОЗДІЛ 3 АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ.....	46
3.1 Архітектура системи	46
3.2 Вибір апаратної платформи	49
3.2.1 Обґрунтування вибору мікроконтролера ESP32-S3.....	49
3.2.2 Вибір інтелектуальних драйверів двигунів TB6612FNG.....	50
3.2.3 Аналіз засобів вимірювання дистанції та індикації	52
3.2.4 Проектування системи енергозабезпечення	54
3.2.5 Проектування вузла керування освітленням	55
3.3 Алгоритм визначення дистанції та логіка роботи системи	56
3.4 Алгоритм обробки даних сенсорів	57
3.5 Інтеграція системи у мобільну платформу.....	59
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	62
РОЗДІЛ 4 Програмна реалізація системи.	63
4.1 Вибір середовища розробки.....	63
4.2 Структура програмного забезпечення	64
4.3 Реалізація алгоритму вимірювання дистанції	65
4.4 Інтерфейс взаємодії з користувачем	68
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	71

РОЗДІЛ 5. ТЕСТУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ	72
5.1 Методика експериментального дослідження.....	72
5.2 Результати тестування	75
5.3 Аналіз точності вимірювань	77
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5	78
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ВСТУП

Сучасний розвиток робототехніки супроводжується активним впровадженням мобільних роботизованих систем у промисловість, освіту та дослідницьку діяльність. Актуальність роботи зумовлена необхідністю створення енергоефективних систем керування мобільними платформами, здатних забезпечувати надійний бездротовий зв'язок і точне маневрування в реальному часі. Для реалізації таких систем перспективним є використання мікроконтролера ESP32-S3 із вбудованими модулями Wi-Fi та Bluetooth.

Метою роботи є проєктування та практична реалізація мобільної роботизованої платформи «Gelik 2.0» із системою автоматичного моніторингу дистанції на базі ESP32-S3. Об'єктом дослідження є процеси керування мобільними робототехнічними платформами, а предметом — програмно-апаратний комплекс взаємодії мікроконтролера, сенсорів та виконавчих механізмів.

У роботі проведено аналіз сучасних засобів контролю дистанції, розроблено апаратну архітектуру платформи, створено програмне забезпечення для обробки даних ультразвукового датчика, реалізовано алгоритм автоматичного паркування та вебінтерфейс дистанційного керування. Практичне значення роботи полягає у створенні функціонального прототипу, який може бути використаний як основа для подальшого впровадження систем автономної навігації та комп'ютерного зору.

РОЗДІЛ I

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ДИСТАНЦІЙ

1.1. Поняття мобільних платформ та їх застосування

Мобільні платформи в робототехніці та автоматизації — це технічні системи, здатні переміщуватися в просторі та виконувати функції вимірювання, моніторингу й взаємодії з середовищем на основі сенсорних даних і керуючих алгоритмів. У задачах автоматичного контролю дистанції вони виступають носіями сенсорів (ультразвукових, лазерних, радіолокаційних або візуальних), обчислювального модуля та виконавчих механізмів руху. Навіть за дистанційного керування платформа може автономно оцінювати небезпечні зближення й реалізовувати захисні дії: обмеження швидкості, зупинку або корекцію траєкторії.[1]

Загальна структура мобільної платформи зазвичай включає механічну основу (шасі), привід (електродвигуни/серводвигуни), систему енергоживлення, сенсорний рівень та обчислювальний рівень (рис. 1.1).

Сенсорний рівень формує вимірювальні дані, а обчислювальний — забезпечує їх обробку, фільтрацію та прийняття рішень у реальному часі. Для моніторингу відстані важливими є частота оновлення, затримка обробки, стійкість до зовнішніх умов і надійність під час руху. У динамічному середовищі додаткові похибки зумовлюються вібраціями, ковзанням, зміною кутів огляду та багатопроточними відбиттями.

Мобільні платформи із системами автоматичного моніторингу дистанції мають досить широку сферу застосування. У робототехніці та автономному транспорті вони використовуються для уникнення зіткнень, побудови карт, локалізації та планування траєкторії на основі різних сенсорів (LiDAR, камери, радари, ультразвук) [1]. У допоміжних технологіях контроль дистанції підвищує безпеку пересування користувачів [1]. У промисловості та логістиці мобільні роботи (AGV/AMR) застосовують такі системи для безпечного руху й маневрування, де точність вимірювань впливає на продуктивність і ризики [2]. У

зовнішніх умовах важливо враховувати вплив середовища та забезпечувати адаптацію або сенсорну надлишковість.[2]



Рисунок 1.1 — Узагальнена структура мобільної платформи з системою автоматичного моніторингу дистанції.

Мобільні платформи також виступають інтеграційним середовищем багатовисерторних систем: поєднання різних технологій підвищує надійність і зменшує “сліпі зони” [3]. Отже, їх доцільно розглядати як комплексні кіберфізичні системи, де дистанційні вимірювання є основою безпеки та навігації.

1.2. Основні задачі контролю дистанції в мобільних системах

Впровадження систем автоматичного моніторингу дистанції в мобільні платформи є критично важливим етапом проектування, що забезпечує перехід від дистанційного керування до елементів автономності. Основна мета таких систем полягає у створенні інформаційного поля навколо робота, яке дозволяє йому адекватно реагувати на зміни в оточуючому середовищі.

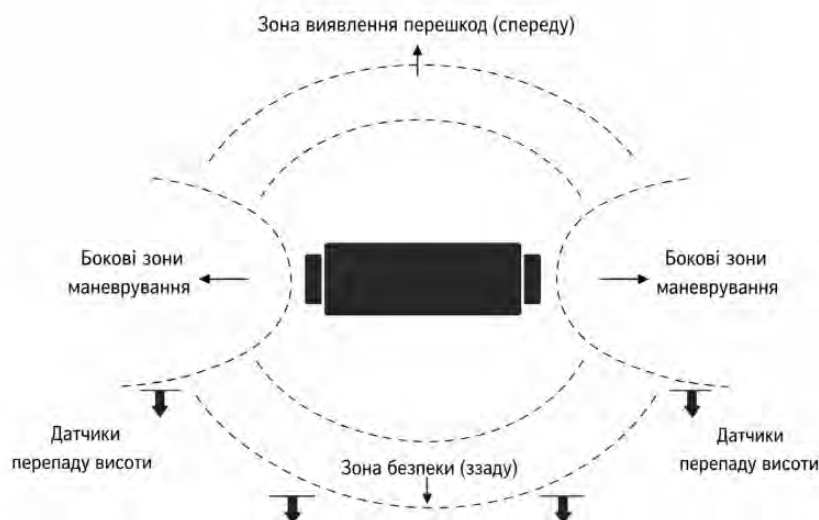


Рисунок 1.2 — Зони контролю дистанції мобільної платформи.

На рисунку 1.2 показано основні зони контролю дистанції навколо мобільної платформи, які формують просторову інформаційну модель оточуючого середовища. Кожна із зон відповідає за виявлення потенційних небезпек або обмежень руху в певному напрямку.

Система контролю дистанції мобільної платформи охоплює фронтальну, бокові та задню зони виявлення перешкод, що забезпечують безпечний рух, маневрування та уникнення зіткнень. Фронтальна зона відповідає за реагування на об'єкти на траєкторії (зниження швидкості або зупинка), бокові — за рух у вузьких просторах і вздовж перешкод, задня — за безпеку під час руху назад. Додатково можуть використовуватися датчики перепаду висоти для виявлення небезпечних ділянок (сходи, краї платформ).

Основною задачею є забезпечення безпеки руху шляхом безперервного визначення відстані, швидкості зближення та гальмівного шляху з подальшим коригуванням руху в реальному часі. Другою важливою функцією є адаптивне маневрування в обмеженому просторі (рух уздовж стін, проходження вузьких ділянок, слідування за об'єктами).

Для ефективної роботи система повинна забезпечувати високу частоту оновлення даних, завадостійкість і достатню точність вимірювань, що особливо важливо для задач локалізації та картографування. Отже, контроль дистанції є базовим рівнем інтелектуальної поведінки мобільної платформи.

1.3 Огляд існуючих технологій вимірювання відстані

Визначення відстані до об'єктів є базовою функцією сенсорних систем мобільних роботів і використовується для уникнення перешкод, навігації, локалізації та картографування. Надійність цих вимірювань безпосередньо визначає можливість безпечної автономної роботи, тому вибір технології є важливим етапом проектування.

У мобільній робототехніці застосовують різні методи вимірювання дистанції, зокрема ультразвукові, інфрачервоні, лазерні та візуальні, які відрізняються принципом дії, точністю та діапазоном.

Ультразвуковий метод є одним із найпоширеніших: він базується на випромінюванні акустичного імпульсу та вимірюванні часу повернення відбитого сигналу, що дозволяє визначити відстань до об'єкта з урахуванням швидкості звуку.[5]

Принцип роботи ультразвукового датчика ілюстровано на рисунку 1.3. Він ґрунтується на випромінюванні короткого імпульсу та прийомі відбитого ехо-сигналу. Такий підхід відомий як метод часу проходження сигналу (Time-of-Flight), де відстань визначається за часом поширення хвилі. Цей метод широко реалізований у датчиках типу HC-SR04, які часто застосовуються в робототехнічних проєктах. До їхніх переваг належать низька вартість, простота підключення та достатня точність на малих і середніх дистанціях.[5, 9]

Ультразвукові датчики мають низку обмежень: їхня точність залежить від температури, вологості та властивостей поверхні об'єкта. М'які або нерівні поверхні можуть поглинати чи розсіювати сигнал, а широкий кут випромінювання призводить до відбиття від кількох об'єктів одночасно.

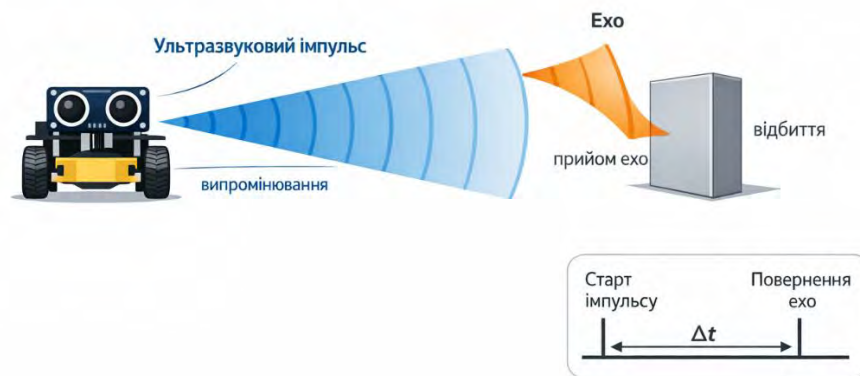


Рисунок 1.3 — Принцип вимірювання відстані за допомогою ультразвукового датчика.

Як показано на рисунку 1.4, у сучасних мобільних робототехнічних системах застосовується декілька основних технологій вимірювання відстані.



Рисунок 1.4 — Основні технології вимірювання відстані в мобільних робототехнічних системах.

Інфрачервоні сенсори визначають відстань за відбитим випромінюванням (Інфрачервоні датчики є компактними та швидкодіючими, проте їхня точність залежить від освітлення й властивостей поверхні об'єкта. Лазерні системи (LiDAR) забезпечують високу точність і дальність вимірювань, але характеризуються вищою вартістю та складністю обробки даних. Методи комп'ютерного зору надають найбільш повну інформацію про навколишнє середовище, однак потребують значних обчислювальних ресурсів.

Таким чином, вибір технології вимірювання відстані визначається вимогами до точності, дальності, швидкодії, енергоспоживання та вартості системи. На практиці для підвищення надійності часто застосовується поєднання кількох методів вимірювання.

Для наочнішого порівняння розглянутих технологій вимірювання відстані їх основні характеристики узагальнено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльні характеристики технологій вимірювання відстані

Технологія вимірювання	Типовий діапазон вимірювання	Точність	Переваги	Недоліки
Ультразвукові датчики	0.02 – 4 м	Середня	Низька вартість, простота інтеграції, невисоке енергоспоживання	Залежність від властивостей поверхні, широкий кут вимірювання
Інфрачервоні датчики	0.1 – 1.5 м	Середня	Компактність, швидка реакція, простота використання	Чутливість до освітлення та кольору поверхні
Лазерні системи (LiDAR)	до 100 м і більше	Висока	Висока точність, можливість побудови карт середовища	Висока вартість, складність обробки даних
Камери та комп'ютерний зір	залежить від алгоритму	Висока	Можливість аналізу сцени та розпізнавання об'єктів	Потреба у значних обчислювальних ресурсах

Аналіз характеристик показує, що вибір технології вимірювання відстані залежить від точності, дальності, швидкості, вартості та складності інтеграції.

1.4 Порівняльний аналіз сучасних рішень

У сучасній робототехніці існує багато мобільних платформ для задач навігації та уникнення перешкод. Їх розвиток зумовлений прогресом мікроконтролерів, сенсорів і бездротового зв'язку, що забезпечило доступність таких систем для досліджень і навчання.[9]

Поширеними є платформи на базі Arduino, які відзначаються простотою, низькою вартістю та використанням базових сенсорів, зокрема ультразвукових,

але мають обмежені обчислювальні можливості. Більш потужні рішення базуються на Raspberry Pi, що дозволяє реалізовувати складні алгоритми навігації та комп'ютерного зору, однак збільшує складність і енергоспоживання.

Промислові та дослідницькі платформи використовують високоточні сенсори, зокрема LiDAR, і здатні виконувати складні задачі автономної навігації, але мають високу вартість.

Отже, вибір платформи залежить від задач і ресурсів, а для досліджень контролю дистанції доцільно використовувати компактні системи, що поєднують функціональність, простоту та доступність.

1.4.1 Навчальні робототехнічні платформи

Одним із найбільш поширених типів мобільних роботів є навчальні робототехнічні платформи, які широко використовуються у навчальних закладах, дослідницьких лабораторіях та аматорських проектах. Такі системи зазвичай будуються на основі мікроконтролерів сімейства Arduino або ESP32 та мають відносно просту механічну конструкцію. Найчастіше використовується двоколісне або чотириколісне шасі, оснащене електродвигунами постійного струму з редукторами.[9] Типову структуру навчальної мобільної робототехнічної платформи показано на рисунку 1.5.

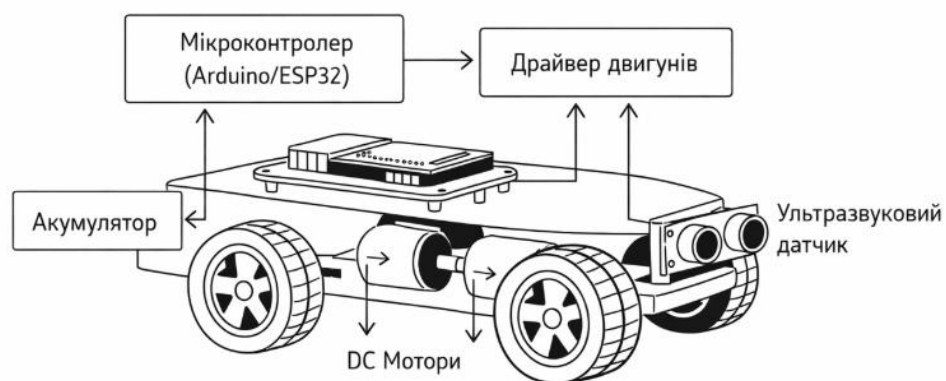


Рисунок 1.5 — Приклад навчальної мобільної робототехнічної платформи на базі мікроконтролера.

Основними компонентами платформи є мікроконтролер, драйвер двигунів, сенсорна система та джерело живлення, що забезпечують керування рухом і обробку даних.

Для навігації та уникнення перешкод застосовуються прості сенсори (ультразвукові або інфрачервоні), які забезпечують достатню точність на малих дистанціях. Обчислювальний модуль виконує обробку даних і формує сигнали керування приводами.

Перевагами таких платформ є доступність, простота інтеграції та наявність програмних бібліотек, однак вони мають обмежені обчислювальні ресурси для реалізації складних алгоритмів.

1.4.2 Роботи на базі одноплатних комп'ютерів

Більш складні мобільні платформи будуються на основі одноплатних комп'ютерів, таких як Raspberry Pi або NVIDIA Jetson, що забезпечують високу обчислювальну потужність і виконання складних алгоритмів у реальному часі.

Такі системи використовують різноманітні сенсори (камери, лазерні далекоміри, інерціальні модулі), що дозволяє реалізовувати алгоритми комп'ютерного зору, локалізації та картографування, зокрема SLAM. [3, 4] Приклад мобільної робототехнічної платформи на базі одноплатного комп'ютера показано на рисунку 1.6.

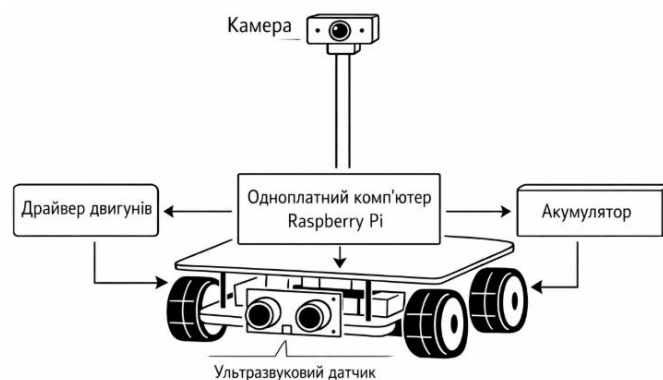


Рисунок 1.6 — Приклад мобільної робототехнічної платформи на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi.

Використання одноплатних комп'ютерів дозволяє реалізовувати складні алгоритми обробки сенсорних даних, зокрема комп'ютерного зору та картографування. Перевагою таких систем є підтримка автономної навігації, однак це супроводжується підвищеним енергоспоживанням і складнішою програмною архітектурою.

1.4.3 Промислові автономні мобільні роботи

Окрему категорію складають промислові автономні мобільні роботи, які застосовуються у логістичних системах, виробничих підприємствах та складських комплексах. Такі платформи використовують складні сенсорні комплекси, що включають лазерні сканери, камери, інерціальні сенсори та системи позиціонування. Приклад промислової автономної мобільної робототехнічної платформи показано на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 — Приклад промислового автономного мобільного робота (AMR).

Промислові мобільні роботи оснащуються високоточними сенсорами, зокрема LiDAR, камерами та інерціальними модулями, що забезпечує точну

навігацію в динамічному середовищі. Дані сенсорів обробляються обчислювальним модулем, який формує команди керування приводами.

Використання алгоритмів локалізації та картографування дозволяє роботам самостійно планувати траєкторію, уникати перешкод і адаптуватися до змін середовища, що робить їх ефективними для логістики та виробництва.

Водночас такі системи відзначаються високою вартістю та складністю, що обмежує їх застосування у навчальних проєктах, але демонструє найвищий рівень розвитку мобільної робототехніки.

1.5 Недоліки існуючих систем

Незважаючи на розвиток мобільної робототехніки, системи контролю дистанції мають низку обмежень, пов'язаних із сенсорами та апаратно-програмною реалізацією. Ультразвукові датчики характеризуються обмеженою точністю та чутливістю до умов середовища, інфрачервоні — залежністю від освітлення, а лазерні системи, зокрема LiDAR, — високою вартістю та складністю обробки даних.

Додатковими недоліками є складна апаратна архітектура, підвищене енергоспоживання та складність реалізації алгоритмів навігації, що потребують значних обчислювальних ресурсів.

Таким чином, актуальним є створення рішень, які поєднують достатню точність, простоту реалізації та доступність компонентів.

1.5.1 Обмеження сенсорних технологій

Однією з основних проблем сучасних систем контролю дистанції є обмеження, пов'язані з використанням різних типів сенсорів. Кожна технологія вимірювання відстані має власні фізичні особливості, які впливають на точність та надійність вимірювань. Наприклад, ультразвукові датчики мають відносно широкий кут випромінювання, через що відбитий сигнал може надходити від різних об'єктів одночасно. Це ускладнює точне визначення відстані до конкретної перешкоди.[5] На рисунку 1.8 показано основні обмеження

сенсорних систем, які використовуються для вимірювання відстані у мобільних роботах.

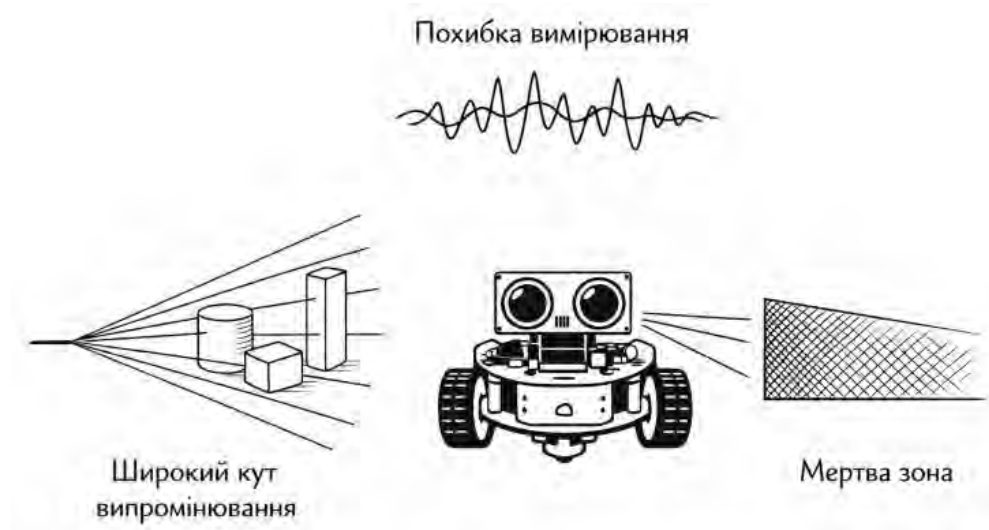


Рисунок 1.8 — Основні обмеження сенсорних систем вимірювання відстані.

Ультразвукові та деякі інші датчики мають широкий кут випромінювання, що формує конусоподібну зону вимірювання і може призводити до відбиття сигналу від кількох об'єктів одночасно, ускладнюючи визначення відстані.

Важливим обмеженням є наявність «мертвих зон» — областей перед сенсором, де вимірювання є некоректним через особливості сигналу. Також на точність впливають умови середовища: структура поверхні, кут відбиття та шуми, що можуть спричиняти похибки.

Додатково ультразвукові хвилі можуть поглинатися або розсіюватися, а інфрачервоні сенсори — залежати від освітлення та оптичних властивостей об'єктів.

1.5.2 Обмеження апаратної реалізації

Однією з основних проблем сучасних систем контролю дистанції є обмеження, пов'язані з використанням різних типів сенсорів. Кожна технологія вимірювання відстані має власні фізичні особливості, які впливають на точність та надійність вимірювань. Наприклад, ультразвукові датчики мають відносно широкий кут випромінювання, через що відбитий сигнал може надходити від

різних об'єктів одночасно. Це ускладнює точне визначення відстані до конкретної перешкоди. На рисунку 1.9 представлено загальну структуру мікроконтролерної робототехнічної системи та показано основні апаратні обмеження, які виникають під час її реалізації.



Рисунок 1.9 — Апаратні обмеження мікроконтролерних робототехнічних платформ.

Центральним елементом такої системи є мікроконтролер, який виконує функції обробки сенсорної інформації, формування сигналів керування та координації роботи інших компонентів. До мікроконтролера підключаються сенсори, драйвери двигунів, модулі пам'яті та система живлення.

Одним із ключових обмежень подібних систем є відносно невелика обчислювальна потужність мікроконтролерів. На відміну від повноцінних комп'ютерних систем, мікроконтролери мають обмежену частоту роботи процесора та невеликий обсяг оперативної пам'яті. Це обмежує можливість використання складних алгоритмів обробки даних та навігації. У деяких випадках система може обробляти сенсорні дані із затримкою, що негативно впливає на швидкість реакції робота на зміну навколишнього середовища.[10]

Ще одним важливим фактором є енергоспоживання системи. Мобільні робототехнічні платформи працюють від акумуляторних джерел живлення, тому ефективність використання енергії має велике значення. Збільшення кількості сенсорів або використання більш потужних обчислювальних модулів може призводити до зростання споживаної потужності та скорочення часу автономної роботи робота. Крім того, ультразвукові хвилі можуть поглинатися або розсіюватися поверхнями з нерівною структурою. Подібні явища можуть призводити до появи помилкових вимірювань або нестабільної роботи системи визначення дистанції. У випадку інфрачервоних сенсорів значний вплив мають умови освітлення та оптичні властивості поверхні об'єкта.

1.5.3 Обмеження програмних алгоритмів

Не менш важливим аспектом є складність програмної реалізації алгоритмів автономної навігації. Реалізація ефективних алгоритмів планування траєкторії, уникнення перешкод та локалізації робота потребує використання складних методів обробки даних та оптимізації.[4, 15]



Рисунок 1.10 — Обмеження алгоритмів обробки даних та навігації мобільних роботів.

На рисунку 1.10 показано основні етапи обробки інформації у системах автономної навігації мобільних роботів. Першим етапом є отримання даних від

сенсорів, які вимірюють різні параметри навколишнього середовища. Ці дані надходять до модуля обробки, де здійснюється фільтрація, аналіз та підготовка інформації для подальшого використання.

Наступним етапом є планування траєкторії руху робота. На цьому етапі система аналізує отримані дані про навколишнє середовище та визначає оптимальний шлях руху з урахуванням наявних перешкод. Однак у реальних умовах дані сенсорів можуть містити шум або бути неповними, що створює додаткові труднощі під час прийняття рішень.

Після визначення траєкторії система керування формує команди для приводів руху робота. На цьому етапі можуть виникати затримки обробки інформації або обмеження, пов'язані з обчислювальними ресурсами системи. Крім того, навколишнє середовище може бути динамічним, тобто перешкоди можуть змінювати своє положення. У таких умовах алгоритми навігації повинні постійно оновлювати інформацію та адаптувати траєкторію руху робота. У багатьох практичних системах виникає необхідність обробки великого обсягу інформації від різних сенсорів у реальному часі. Це потребує використання ефективних алгоритмів фільтрації даних, злиття сенсорної інформації та адаптивного керування рухом робота.

Таким чином, аналіз наведених рисунків дозволяє зробити висновок, що сучасні системи контролю дистанції та автономної навігації мобільних роботів мають ряд технічних обмежень, які пов'язані з особливостями сенсорних технологій, апаратної архітектури та алгоритмів обробки інформації. Урахування цих обмежень є важливим етапом під час проектування нових робототехнічних систем.

1.6. Технічне завдання на проєкт

Метою проєкту є розробка мобільної робототехнічної платформи з системою автоматичного моніторингу дистанції, здатної забезпечувати:

- виявлення перешкод у реальному часі;

- оцінку відстані до об'єктів;
- автоматичне реагування (зупинка, об'їзд, корекція руху).

Призначення системи — використання у навчальних, дослідницьких та експериментальних робототехнічних задачах.

Система повинна забезпечувати:

- вимірювання дистанції в реальному часі;
- виявлення перешкод у фронтальній зоні;
- автоматичне реагування на небезпечні ситуації;
- стабільну роботу в умовах руху;
- можливість дистанційного керування.

Технічні характеристики:

- Діапазон вимірювання: не менше 2–4 м;
- Похибка вимірювання: не більше 5–10%;
- Час реакції системи: не більше 100–200 мс;
- Автономність роботи: не менше 30–60 хв;
- Підтримка бездротового зв'язку (Wi-Fi / Bluetooth).

Система повинна включати:

- мікроконтролер (наприклад, ESP32 або Arduino);
- сенсори дистанції (ультразвукові та/або інші);
- драйвер двигунів;
- електродвигуни постійного струму;
- акумуляторне живлення.

Програмне забезпечення повинно:

- забезпечувати обробку сенсорних даних;
- реалізовувати алгоритми уникнення перешкод;
- підтримувати керування рухом платформи;
- мати можливість розширення (додавання нових сенсорів або алгоритмів).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У розділі проведено аналіз сучасних систем автоматичного моніторингу дистанції для мобільних робототехнічних платформ. Встановлено, що мобільні платформи є складними кіберфізичними системами, в яких сенсорні вимірювання дистанції відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки руху та реалізації навігаційних функцій.

Розглянуто основні задачі контролю дистанції, серед яких визначальними є виявлення перешкод, оцінка відстані до об'єктів, адаптивне маневрування та формування безпечної траєкторії руху. Показано, що ефективність таких систем значною мірою залежить від швидкості обробки даних, точності вимірювань та стійкості до зовнішніх впливів.

Проаналізовано основні технології вимірювання відстані (ультразвукові, інфрачервоні, лазерні та візуальні). Встановлено, що кожна з них має власні переваги та обмеження, а універсального рішення не існує. Найбільш доцільним є використання комбінованих сенсорних систем, що дозволяє підвищити надійність і точність вимірювань.

Проведено порівняльний аналіз сучасних мобільних платформ, який показав, що вибір архітектури залежить від поставлених задач і доступних ресурсів. Мікроконтролерні системи характеризуються простотою та доступністю, тоді як платформи на базі одноплатних комп'ютерів і промислові рішення забезпечують вищу функціональність, але мають більшу складність і вартість.

Виявлено основні недоліки існуючих систем, зокрема обмеження сенсорів, складність апаратної реалізації та значні вимоги до обчислювальних ресурсів. Це підтверджує актуальність розробки ефективних, доступних і водночас достатньо точних систем контролю дистанції.

Таким чином, результати аналізу обґрунтовують необхідність створення мобільної платформи з оптимальною сенсорною системою, що поєднує простоту реалізації, достатню точність і можливість подальшого розвитку.

РОЗДІЛ 2

Технології та сенсори вимірювання дистанції

Ефективна робота мобільної робототехнічної платформи в динамічному середовищі неможлива без надійної системи вимірювання відстані до навколишніх об'єктів. Сучасні технології сенсорики пропонують широкий спектр рішень, що відрізняються фізичним принципом роботи, точністю, діапазоном вимірювання, вартістю та складністю інтеграції у систему керування. Вибір конкретного сенсора або комбінації сенсорів є одним із ключових проектних рішень, яке безпосередньо визначає надійність, продуктивність та вартість усієї робототехнічної системи. Помилковий вибір технології може призвести до появи систематичних похибок вимірювання, зниження швидкодії алгоритмів навігації або навіть до небезпечних ситуацій, пов'язаних із неможливістю своєчасного виявлення перешкод.

У другому розділі розглянуто основні типи сенсорів вимірювання дистанції, що застосовуються у мобільній робототехніці: ультразвукові датчики, лазерні та LiDAR-сенсори, камерні системи комп'ютерного зору та радіолокаційні датчики. Для кожного типу сенсора проаналізовано його фізичний принцип дії, ключові технічні характеристики, переваги та недоліки, а також сфери практичного застосування. Особлива увага приділяється практичним аспектам інтеграції сенсорів у мікроконтролерні системи, оскільки саме ця задача є однією з центральних при розробці платформи «Gelik 2.0».

2.1 Ультразвукові датчики відстані

Ультразвукові датчики є одним із найбільш поширених і доступних засобів вимірювання дистанції в мобільній робототехніці завдяки низькій вартості, простоті підключення та достатній точності. Вони широко застосовуються для реалізації базових функцій навігації та уникнення перешкод.

Незважаючи на розвиток сучасніших технологій, ці датчики залишаються актуальними через свою надійність і доступність. Їх використання розпочалося

ще у 1970–1980-х роках, а подальший розвиток призвів до зменшення вартості, габаритів і підвищення ефективності, що забезпечило їх широке застосування — від навчальних до промислових систем.

2.1.1 Фізичний принцип роботи

Робота ультразвукових датчиків базується на акустичному методі вимірювання відстані, відомому як метод «Луна-імпульс». Принцип полягає у випромінюванні короткого ультразвукового імпульсу у напрямку об'єкта та реєстрації відбитого від нього сигналу (луна-сигналу). Оскільки швидкість поширення звукових хвиль у повітрі є відомою фізичною величиною, відстань до об'єкта визначається шляхом вимірювання часового інтервалу між моментом відправлення імпульсу та моментом отримання відбитого сигналу.[5]

Генерація ультразвукових коливань здійснюється за допомогою п'єзоелектричного перетворювача, принцип роботи якого заснований на зворотному п'єзоелектричному ефекті: подача електричної напруги змінної частоти на п'єзокристал призводить до його механічних коливань, які передаються у навколишнє повітряне середовище у вигляді акустичних хвиль. Прийом відбитого сигналу реалізується на основі прямого п'єзоефекту: механічна деформація кристала під дією акустичного тиску луна-сигналу генерує електричну напругу, яка підсилюється та обробляється електронною схемою датчика.

Математично відстань до об'єкта розраховується за наступною формулою:

$$d = (v_s \cdot t) / 2$$

де d — відстань до об'єкта (м), v_s — швидкість звуку в повітрі (приблизно 343 м/с за температури 20°C), t — час проходження сигналу в обидва боки (с). Ділення на 2 враховує двостороннє проходження сигналу: від датчика до об'єкта і назад.

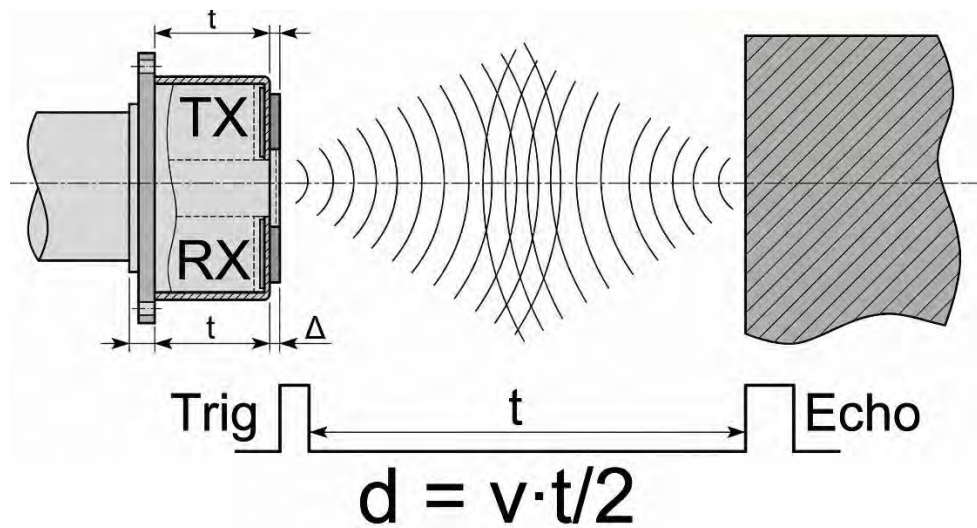


Рисунок 2.1 — Принцип роботи ультразвукового датчика за методом луна-імпульсу

Як показано на рисунку 2.1, датчик складається з двох основних елементів: п'єзоелектричного передавача (TX) та п'єзоелектричного приймача (RX). Передавач генерує серію ультразвукових коливань частотою 40 кГц. Хвилі поширюються у повітрі у вигляді конусоподібного пучка та відбиваються від поверхні першої зустрінутої перешкоди. Приймач реєструє луна-сигнал, після чого електронна схема вимірює тривалість часового інтервалу й обчислює відстань за наведеною формулою.[5]

Важливо враховувати, що швидкість звуку v_s суттєво залежить від температури навколишнього середовища і може бути уточнена за лінійною апроксимацією:

$$v_s = 331.5 + 0.607 \cdot T$$

де T — температура повітря в градусах Цельсія.

Точність ультразвукових вимірювань залежить від температури: її зміна може спричиняти похибку до $\approx 7\%$, тому в точних системах застосовується температурна компенсація за допомогою додаткових датчиків. Вплив вологості та тиску є меншим і зазвичай не враховується.

Вимірювання здійснюється за часовим протоколом: мікроконтролер подає імпульс на вхід Trig, після чого датчик випромінює ультразвуковий сигнал і

формує імпульс на виході Echo, тривалість якого відповідає відстані до об'єкта. Між вимірюваннями витримується пауза для запобігання завадам.

2.1.2 Типи ультразвукових датчиків та їх характеристики

У мобільній робототехніці широко застосовується ультразвуковий модуль HC-SR04, який забезпечує вимірювання в діапазоні 2–400 см із похибкою до 3 мм. Він працює від 5 В, має низьке енергоспоживання та кут огляду близько 15°.

Модуль використовує інтерфейс Trig/Echo: імпульс на вході Trig ініціює вимірювання, а тривалість сигналу Echo пропорційна відстані. Для перерахунку використовується коефіцієнт ≈ 58.8 мкс на 1 см.

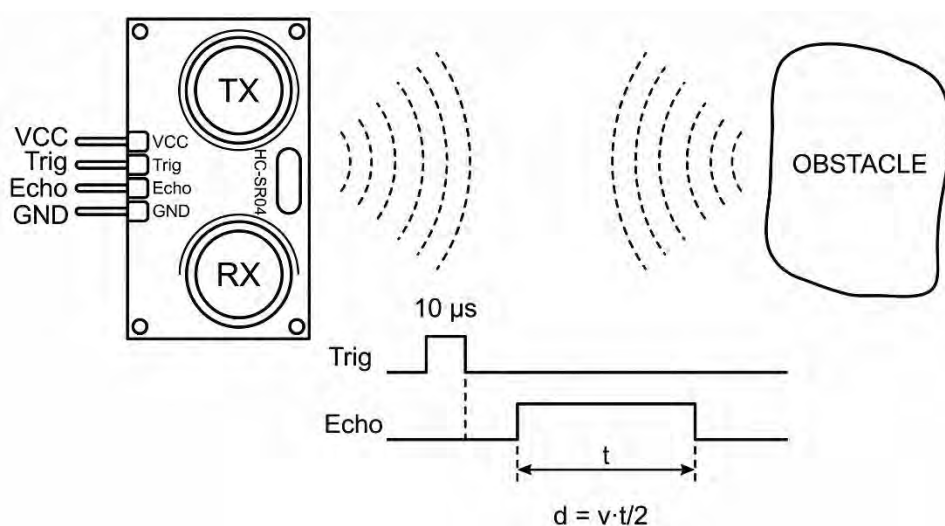


Рисунок 2.2 — Модуль ультразвукового датчика HC-SR04 та часова діаграма його роботи

На рисунку 2.2 зображено модуль HC-SR04 та відповідну часову діаграму сигналів керування. Чітко видно послідовність взаємодії мікроконтролера та датчика: формування ініціюючого імпульсу на лінії Trig, автоматичне відправлення ультразвукових пакетів датчиком та формування відповідного Echo-сигналу, тривалість якого несе інформацію про виміряну відстань.

Відсутність Echo-сигналу або його максимальна тривалість (близько 38 мс) свідчить про те, що відбитий сигнал не було зареєстровано.

Окрім базового HC-SR04, використовуються спеціалізовані ультразвукові датчики. Модель HC-SR04P підтримує живлення 3.3–5 В і сумісна з сучасними мікроконтролерами. Датчик JSN-SR04T має захист IP65 для роботи в складних умовах. Для підвищеної точності та більшого діапазону застосовуються сенсори серії Maxbotix, які забезпечують вимірювання до ≈ 6.5 м.

Порівняння технічних характеристик найбільш поширених ультразвукових датчиків наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняльні технічні характеристики поширених ультразвукових датчиків

Параметр	HC-SR04	HC-SR04P	JSN-SR04T	Maxbotix LV-EZ1
Напруга живлення	5 В	3.3–5 В	5 В	2.5–5.5 В
Діапазон вимірювання	2–400 см	2–450 см	20–600 см	15–645 см
Типова похибка	± 3 мм	± 3 мм	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$
Робоча частота	40 кГц	40 кГц	40 кГц	42 кГц
Кут огляду	$\sim 15^\circ$	$\sim 15^\circ$	$\sim 75^\circ$	$\sim 25^\circ$
Струм споживання	15 мА	15 мА	30 мА	2 мА
Частота оновлення	до 17 Гц	до 17 Гц	до 17 Гц	до 20 Гц
Ступінь захисту	IP00	IP00	IP65	IP00
Інтерфейс	Trig/Echo	Trig/Echo	Trig/Echo	Аналог/UART/TTL
Орієнтовна вартість	\$0.5–1	\$0.8–1.5	\$3–5	\$25–35

Як видно з таблиці 2.1, датчики класу HC-SR04 є найбільш доступними за вартістю й цілком задовольняють потреби більшості навчальних та дослідницьких проектів. Більш спеціалізовані рішення, такі як JSN-SR04T або

Maxbotix, суттєво розширюють функціональні можливості та підвищують надійність у специфічних умовах, однак їх вартість є значно вищою. При виборі конкретного модуля визначальними факторами є сумісність рівнів логіки з мікроконтролером, вимоги до діапазону та точності вимірювання, умови навколишнього середовища, а також бюджет проекту.

2.1.3 Взаємодія з навколишнім середовищем та фактори впливу на точність

Точність ультразвукових вимірювань значною мірою залежить не лише від характеристик самого датчика, але й від властивостей навколишнього середовища та геометрії об'єктів. Найбільш точні результати досягаються у випадку, коли сигнал відбивається від твердих, гладких і перпендикулярно орієнтованих поверхонь, які забезпечують максимальне повернення енергії до приймача. Водночас м'які, пористі або нерівні матеріали (наприклад, тканини, поролон або рослинність) можуть поглинати або розсіювати ультразвукові хвилі, що призводить до зменшення амплітуди відбитого сигналу та зниження точності вимірювання.

Додатковим джерелом похибок є кут нахилу поверхні відносно осі датчика. Якщо об'єкт розташований під кутом, відбитий сигнал може не повернутися до приймача, а відхилитися в інший бік. Це може спричиняти як значні помилки у визначенні відстані, так і повну відсутність сигналу, що особливо критично під час навігації у середовищах зі складною геометрією.

Ще одним важливим фактором є взаємні завади між кількома ультразвуковими датчиками, які працюють одночасно. Таке явище, відоме як перехресні завади (crosstalk), може призводити до некоректних вимірювань. Для його усунення застосовується часове розділення вимірювань, при якому датчики активуються по черзі.

Крім того, на точність вимірювань можуть впливати повітряні потоки та турбулентність. У приміщеннях цей вплив зазвичай незначний, однак у

зовнішніх умовах, зокрема для мобільних роботів, що працюють на відкритому повітрі, його необхідно враховувати.

2.1.4 Переваги та недоліки ультразвукових датчиків

Ультразвукові датчики широко застосовуються завдяки низькій вартості, простоті підключення та нечутливості до освітлення. Вони сумісні з більшістю мікроконтролерів і здатні працювати з різними матеріалами, включаючи прозорі поверхні.

Водночас їхні недоліки включають обмежену точність, залежність від властивостей поверхні та широкий кут огляду, що ускладнює визначення конкретного об'єкта. Також характерними є наявність «мертвої зони» на малих відстанях і відносно низька частота оновлення даних, що може обмежувати використання у швидкодіючих системах.

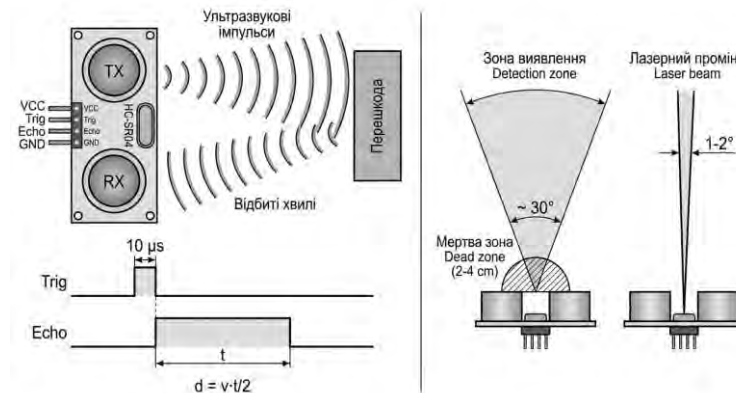


Рисунок 2.3 — Зона чутливості ультразвукового датчика та явище мертвої зони

На рисунку 2.3 наочно продемонстровано характерну зону чутливості ультразвукового датчика. Конусоподібна форма зони вимірювання означає, що сенсор реагує на найближчий об'єкт у межах всього кута огляду, а не лише в центральному напрямку. Такий ефект може призводити до хибних спрацювань у середовищах зі складною геометрією. Ця особливість є одним із ключових

факторів, який слід враховувати при проектуванні системи уникнення перешкод та розміщенні датчиків на корпусі мобільної платформи.

2.1.5 Інтеграція у мікроконтролерні системи та програмна реалізація

Підключення ультразвукового датчика HC-SR04 до мікроконтролера ESP32-S3 здійснюється за схемою VCC, GND, Trig і Echo. Через різницю рівнів логіки (5 В і 3.3 В) необхідно використовувати дільний напруги або перетворювач рівнів, тоді як модуль HC-SR04P підтримує пряму сумісність.[10]

Програмно вимірювання реалізується через формування імпульсу Trig і визначення тривалості сигналу Echo, яка пропорційна відстані. Використання функції `pulseIn()` є простим, але блокує виконання програми, тому для багатозадачних систем доцільно застосовувати апаратні переривання.

Для підвищення точності використовуються методи фільтрації, зокрема ковзне середнє, медіанний фільтр або фільтр Калмана. Важливим є також правильне розміщення датчиків (центральный і бокові під кутом), що забезпечує ефективне покриття простору.[13]

Таким чином, ультразвукові датчики є оптимальним рішенням для мобільних платформ початкового рівня, однак їх використання потребує врахування обмежень та правильної організації обробки даних.

2.2 Лазерні та LiDAR-сенсори

Лазерні сенсори, зокрема LiDAR, є одними з найточніших засобів вимірювання відстані в робототехніці. Вони використовують електромагнітне випромінювання, що забезпечує високу точність, малий кут розходження променя та стійкість до акустичних завад.

Спочатку технологія застосовувалась в аерокосмічній галузі для створення тривимірних моделей рельєфу, а з розвитком стала доступною для мобільних роботів і промислових систем. Сьогодні компактні лазерні далекоміри використовуються навіть у бюджетних робототехнічних проєктах.

2.2.1 Фізичний принцип роботи лазерних сенсорів

В основі роботи лазерних сенсорів відстані лежить принцип вимірювання часу прольоту світлового імпульсу (Time-of-Flight, ToF). Лазерний передавач генерує надзвичайно короткий імпульс когерентного електромагнітного випромінювання, який поширюється у напрямку об'єкта зі швидкістю світла. Після відбиття від поверхні об'єкта частина випромінювання повертається до фотодіодного приймача датчика. Вимірюючи час між відправленням імпульсу та реєстрацією відбитого сигналу, система обчислює відстань до об'єкта.[6, 8]

Математично відстань до об'єкта визначається за формулою, аналогічною до ультразвукового методу, проте з використанням швидкості світла замість швидкості звуку:

$$d = (c \cdot t) / 2$$

де d — відстань до об'єкта (м), c — швидкість світла у вакуумі (приблизно 3×10^8 м/с), t — час прольоту сигналу в обидва боки (с).

Використання швидкості світла замість швидкості звуку має принципове значення: по-перше, надзвичайно висока швидкість поширення сигналу дозволяє вимірювати відстані на рівні десятків і навіть сотень метрів за мікросекунди, по-друге, швидкість світла практично не залежить від температури, вологості або атмосферного тиску, що забезпечує стабільність вимірювань у широкому діапазоні умов навколишнього середовища.

Оскільки час прольоту навіть для відносно великих відстаней є надзвичайно малим (наприклад, для відстані 1 м це лише близько 6.7 нс), лазерні ToF-системи вимагають застосування надвисокоточної електроніки для вимірювання часових інтервалів. У сучасних інтегрованих ToF-датчиках (наприклад, STMicroelectronics VL53L1X) вимірювання виконується спеціалізованою схемою часового перетворювача (Time-to-Digital Converter, TDC), що дозволяє реєструвати часові інтервали з роздільною здатністю одиниць пікосекунд.[6]

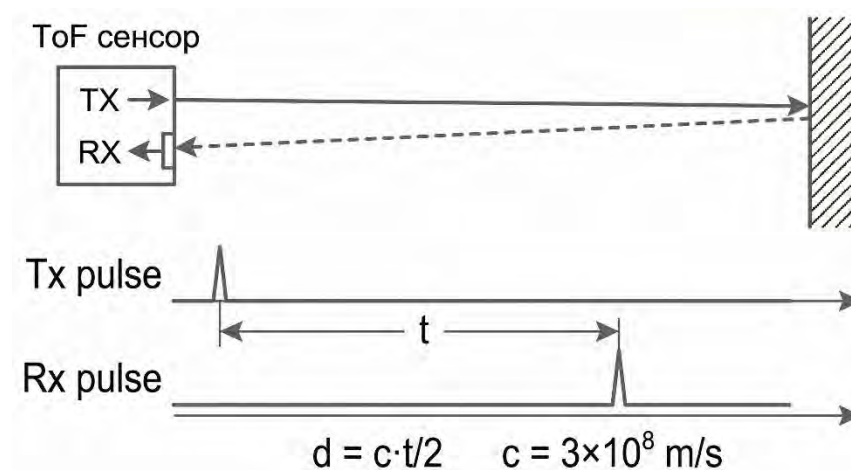


Рисунок 2.4 — Принцип роботи лазерного ToF-сенсора та формування відбитого сигналу

Як показано на рисунку 2.4, лазерний ToF-сенсор випромінює вузьконаправлений імпульс, який після відбиття від поверхні об'єкта повертається до фотоприймача. Завдяки надзвичайно малому куту розходження лазерного пучка (як правило, менше 1° для точкових систем) датчик вимірює відстань до чітко визначеної ділянки поверхні, а не до «першого об'єкта у конусі огляду», як це відбувається у ультразвукових датчиків. Ця особливість є однією з ключових переваг лазерних систем для задач точного позиціонування та навігації.

Окрім методу ToF, у лазерних далекомірах також застосовується метод фазового зсуву (Phase-Shift Ranging). У таких системах лазер генерує неперервне модульоване випромінювання, а відстань визначається на основі фазової різниці між відправленим та отриманим сигналами. Цей метод забезпечує дещо вищу точність на коротких відстанях, однак має обмежений максимальний діапазон вимірювання та більш складну схемотехнічну реалізацію. Ще одним поширеним підходом є метод тріангуляції, де відстань визначається за зміщенням зображення лазерної точки на матриці фотоприймача — саме цей принцип лежить в основі більшості компактних інфрачервоних далекомірів Sharp та аналогічних пристроїв.[8]

2.2.2 Типи лазерних сенсорів та систем LiDAR

Лазерні сенсори поділяються на три основні типи: одновимірні ToF-далекоміри, двовимірні планарні та тривимірні LiDAR-системи, кожен з яких має свої особливості застосування, переваги та обмеження.[7, 8]

Одновимірні ToF-датчики є найбільш компактними та доступними. Вони вимірюють відстань в одному напрямку та відзначаються високою точністю, малими габаритами і низьким енергоспоживанням, що робить їх зручними для використання у мобільних платформах малого розміру.

Двовимірні LiDAR-системи виконують сканування простору в одній площині, формуючи набір вимірювань у різних напрямках. Це дозволяє будувати карти середовища та реалізовувати алгоритми локалізації і навігації, зокрема SLAM, тому такі сенсори широко застосовуються у мобільній робототехніці.

Тривимірні LiDAR-системи забезпечують об'ємне сканування та формують детальну просторову модель середовища у вигляді хмари точок. Вони використовуються у складних автономних системах, зокрема безпілотному транспорті, однак їх висока вартість і складність обробки даних обмежують використання у навчальних і бюджетних проєктах.

Рисунок 2.5 наочно ілюструє відмінності між трьома основними типами лазерних сенсорів.

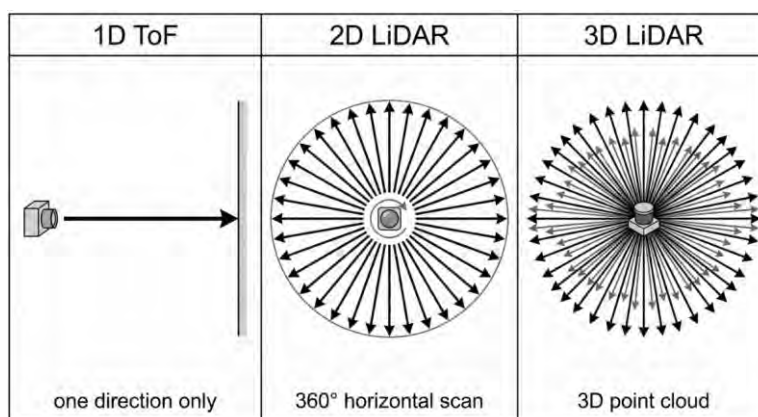


Рисунок 2.5 — Порівняння типів лазерних сенсорів: одновимірний ToF-далекомір, 2D LiDAR та 3D LiDAR

Зростання функціональних можливостей від одновимірного до тривимірного сканування супроводжується суттєвим зростанням складності та вартості системи.

2.2.3 Порівняльні характеристики лазерних сенсорів

Нижче наведено порівняльні технічні характеристики найбільш поширених лазерних сенсорів, що застосовуються у мобільній робототехніці. Таблиця 2.2 охоплює як компактні одновимірні ToF-датчики, придатні для інтеграції у бюджетні платформи, так і планарні LiDAR-системи, що використовуються у більш розвинених дослідницьких роботах.

Таблиця 2.2 — Порівняльні технічні характеристики лазерних сенсорів

Параметр	VL53L1X	VL53L5C X	RPLIDAR A1	RPLIDAR A2	Hokuyo URG- 04
Тип сенсора	1D ToF	3D ToF матриця	2D LiDAR	2D LiDAR	2D LiDAR
Діапазон вимірювання	0.04–4 м	0.02–4 м	0.15–12 м	0.15–18 м	0.02–5.6 м
Точність вимірювання	±5 мм	±5 мм	±1%	±1%	±10 мм
Кут огляду	25°×25°	60°×60°	360°	360°	240°
Частота оновлення	до 50 Гц	до 15 Гц	5–10 Гц	10–15 Гц	10 Гц
Інтерфейс	I ² C	I ² C	UART	UART	USB/RS-232
Напруга живлення	2.8–3.5 В	2.8–3.5 В	5 В	5 В	5 В
Орієнтовна вартість	\$5–10	\$15–30	\$80–120	\$150–250	\$1000+

Як видно з таблиці 2.2, одновимірні ToF-датчики типу VL53L1X є найбільш доступними та простими у інтеграції представниками класу лазерних сенсорів. Їх вартість порівнянна з більш складними ультразвуковими модулями,

тоді як точність вимірювання є суттєво вищою завдяки вузькому куту огляду та стабільній швидкості поширення світла. Матрицевий ToF-датчик VL53L5CX забезпечує формування 8×8 масиву дальностей, що дає можливість отримати просте тривимірне уявлення про навколишній простір у межах кута $60^\circ \times 60^\circ$. Планарні LiDAR-системи серії RPLIDAR значно дорожчі, однак надають повноцінну 2D-карту навколишнього середовища з кутовим охопленням 360° , що робить їх незамінними для задач SLAM та автономної навігації.[7]

2.2.4 Переваги та недоліки лазерних сенсорів

Лазерні сенсори мають низку принципових переваг порівняно з іншими технологіями вимірювання відстані. Найважливішою з них є висока точність: сучасні ToF-датчики забезпечують похибку на рівні одиниць міліметрів, що значно перевищує точність ультразвукових сенсорів. Мала кутова розходимість лазерного променя дозволяє точно визначати відстань до конкретного об'єкта навіть у середовищі з великою кількістю перешкод, де інші датчики можуть давати неоднозначні результати. Крім того, швидкість світла практично не залежить від температури та вологості, що забезпечує стабільність метрологічних характеристик.[6, 8]

Важливою перевагою є також висока швидкодія: ToF-датчики можуть виконувати десятки вимірювань за секунду, а LiDAR-системи формують повні скани простору з частотою до 5–15 Гц. Це дозволяє системам навігації оперативно реагувати на зміни середовища. Додатково сучасні лазерні сенсори мають компактні розміри та низьке енергоспоживання, що спрощує їх інтеграцію у мобільні платформи.

Водночас лазерні системи мають і ряд обмежень. Їх робота залежить від оптичних властивостей поверхні: темні або поглинаючі матеріали зменшують рівень відбитого сигналу, що погіршує точність. Також на результати вимірювань може впливати зовнішнє освітлення, особливо інтенсивне сонячне випромінювання. Прозорі матеріали, такі як скло, можуть пропускати лазерне випромінювання, що призводить до хибних вимірювань.[6]

Додатковими недоліками є відносно висока вартість LiDAR-систем та підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів для обробки великого обсягу даних. Це обмежує їх використання у навчальних і бюджетних проєктах, незважаючи на високі технічні характеристики.

2.2.5 Застосування лазерних сенсорів у мобільній робототехніці

У мобільній робототехніці лазерні сенсори знайшли широке застосування завдяки своїй точності та надійності. Одновимірні ToF-датчики (наприклад, VL53L1X) широко використовуються у системах уникнення перешкод мобільних роботів, де важливі висока точність та стабільність вимірювань. Завдяки інтерфейсу I²C ці датчики легко підключаються до мікроконтролера ESP32-S3 без необхідності у точному вимірюванні часових інтервалів — вся складна логіка ToF-вимірювання реалізована у самому датчику та доступна через програмний інтерфейс.

Планарні LiDAR-системи типу RPLIDAR є ключовим компонентом дослідницьких мобільних роботів, що реалізують алгоритми SLAM. Поєднуючи дані планарного LiDAR із алгоритмами на зразок GMapping або Hector SLAM, мобільна платформа може автономно будувати карту невідомого приміщення та одночасно визначати своє положення на цій карті — без жодного попереднього знання про навколишнє середовище. Такий підхід є базою для автономних роботів-прибиральників, складських AMR та дослідницьких платформ.[4, 7][4, 7]

У контексті платформи «Gelik 2.0» лазерні ToF-сенсори (зокрема серія VL53L1X) становлять інтерес як перспективний напрямок для подальшого розширення сенсорної системи. У поточній реалізації платформи застосовано ультразвуковий датчик HC-SR04, що є перевіреним і широко підтримуваним рішенням, яке повністю задовольняє вимоги до вимірювання дистанції у рамках поставлених задач. Детальний розгляд апаратної конфігурації системи вимірювання дистанції наведено у розділі 3.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі виконано детальний технічний аналіз основних типів сенсорів вимірювання дистанції, що застосовуються у мобільній робототехніці. На підставі проведеного дослідження зроблено такі висновки.

Ультразвукові датчики відстані, зокрема модуль HC-SR04, реалізують метод луна-імпульсу на частоті 40 кГц та забезпечують вимірювання у діапазоні 2–400 см з похибкою до 3 мм за оптимальних умов. Завдяки простому цифровому інтерфейсу Trig/Echo, низькій вартості та сумісності з мікроконтролером ESP32-S3 датчик HC-SR04 є ефективним рішенням для задач уникнення перешкод у мобільних платформах. Застосування методів цифрової фільтрації та асинхронного зчитування через апаратні переривання забезпечує стабільну роботу сенсорної системи в умовах руху.

Лазерні сенсори та системи LiDAR забезпечують вузький кут вимірювального пучка та стабільність характеристик незалежно від температури навколишнього середовища. Планарні LiDAR-системи серії RPLIDAR є ключовим компонентом для реалізації алгоритмів SLAM у дослідницьких роботах, тоді як компактні ToF-датчики серії VL53L1X з інтерфейсом I²C можуть розглядатись як перспективне доповнення до сенсорної системи платформи у подальших модифікаціях.[6, 14]

Порівняльний аналіз характеристик сенсорів (таблиці 2.1 та 2.2) підтвердив, що вибір конкретного типу датчика визначається компромісом між точністю вимірювання, діапазоном дії, вартістю та складністю інтеграції. Для платформи «Gelik 2.0» із урахуванням апаратної бази ESP32-S3, вимог до автономності та бюджету проекту ультразвуковий датчик HC-SR04 забезпечує необхідний баланс між функціональністю та ресурсовитратами, повністю задовольняючи вимоги поставлених задач.

Результати аналізу, виконаного у другому розділі, є основою для проектування апаратної та програмної частини системи автоматичного моніторингу дистанції, що детально розглядається у розділі 3.

РОЗДІЛ 3

АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ

У третьому розділі дипломної роботи здійснюється перехід від теоретичного аналізу існуючих технологій вимірювання відстані до безпосереднього інженерного проектування та системної інтеграції апаратно-програмного комплексу «Gelіk 2.0». Основною метою даного етапу є реалізація концепції інтелектуального паркувального асистента (парктроніка) на базі мобільної колісної платформи, що забезпечує високу точність моніторингу простору та адаптивне керування рухами в реальному часі.

Процес розробки системи базується на впровадженні сучасного мікроконтролера ESP32-S3, який виступає центральним обчислювальним ядром, та ультразвукових засобів вимірювання дистанції. Проектування проводиться з урахуванням специфіки вибраного шасі — повнопривідної платформи з чотирма двигунами, що вимагає розробки складної системи розподілу потужності та синхронізації приводів. Особлива увага приділяється реалізації режиму «PARK», який імітує роботу штатних автомобільних систем безпеки, де швидкість наближення до перешкоди та інтенсивність звукового оповіщення перебувають у прямій залежності від поточної дистанції.[5]

У межах даного розділу вирішуються задачі формування цілісної архітектури системи, обґрунтування вибору елементної бази (зокрема драйверів двигунів, модулів комутації та джерел живлення), а також розробки математичних моделей і алгоритмів, що забезпечують стабільне функціонування парктроніка. Описані технічні рішення спрямовані на створення енергоефективного та надійного прототипу, що здатен працювати як у режимі дистанційного керування через веб-інтерфейс, так і в автономному режимі запобігання зіткненням.

3.1 Архітектура системи

Проектування архітектури мобільної платформи «Gelіk 2.0» базується на принципах модульності та обробки даних у реальному часі, що є

фундаментальною вимогою для систем автоматичного паркування. Основна концепція побудови системи полягає у створенні багаторівневої ієрархічної структури, де кожен рівень функціонально відповідає за конкретний етап трансформації інформації — від первинного сприйняття фізичних параметрів середовища до генерації високоточних керуючих сигналів для виконавчих механізмів. Такий підхід дозволяє забезпечити високу надійність системи та полегшує процес інтеграції нових функціональних модулів без зміни загальної логіки роботи пристрою.

Фундаментальною ланкою архітектури є рівень сприйняття або отримання інформації, який у даному проєкті представлений ультразвуковим сенсором HC-SR04. Його основна роль полягає у безперервному моніторингу простору перед мобільною платформою шляхом генерації та прийому акустичних імпульсів. На цьому етапі відбувається первинна апаратна обробка сигналу, а отримані часові інтервали передаються на наступний рівень для подальшого аналізу. Ефективність роботи цього рівня безпосередньо впливає на точність всього паркувального асистента, оскільки будь-які похибки у вимірюванні дистанції можуть призвести до некоректної роботи алгоритмів уповільнення.[5]

Наступною важливою ланкою є інформаційно-керуючий рівень, ядром якого виступає мікроконтролер ESP32-S3. Завдяки своїй високопродуктивній двоядерній архітектурі, контролер забезпечує паралельну обробку декількох критично важливих процесів. Одне обчислювальне ядро повністю фокусується на підтримці мережевого стеку та функціонуванні веб-сервера для реалізації дистанційного керування через смартфон, тоді як друге ядро виконує розрахунки в реальному часі для алгоритму «PARK», обробляючи дані з датчика відстані та формуючи команди для силових приводів. Така децентралізація обчислювальних ресурсів дозволяє досягти мінімальних затримок у реакції системи на появу перешкод, що є критично важливим для уникнення зіткнень.[10]

Виконавчий рівень архітектури об'єднує в собі силову частину та засоби зворотного зв'язку з користувачем. До його складу входять драйвери двигунів

TB6612FNG, які перетворюють низькопотужні логічні сигнали керування у силові імпульси, необхідні для роботи чотирьох тягових двигунів постійного струму. Окрім силових приводів, цей рівень включає модуль активного бузера, що забезпечує акустичну імітацію роботи парктроніка, та спеціалізований релейний модуль для комутації фар робоплатформи. Використання реле з транзисторним ключем дозволяє реалізувати надійну гальванічну розв'язку, захищаючи чутливі порти мікроконтролера від високих струмів освітлювальної системи.

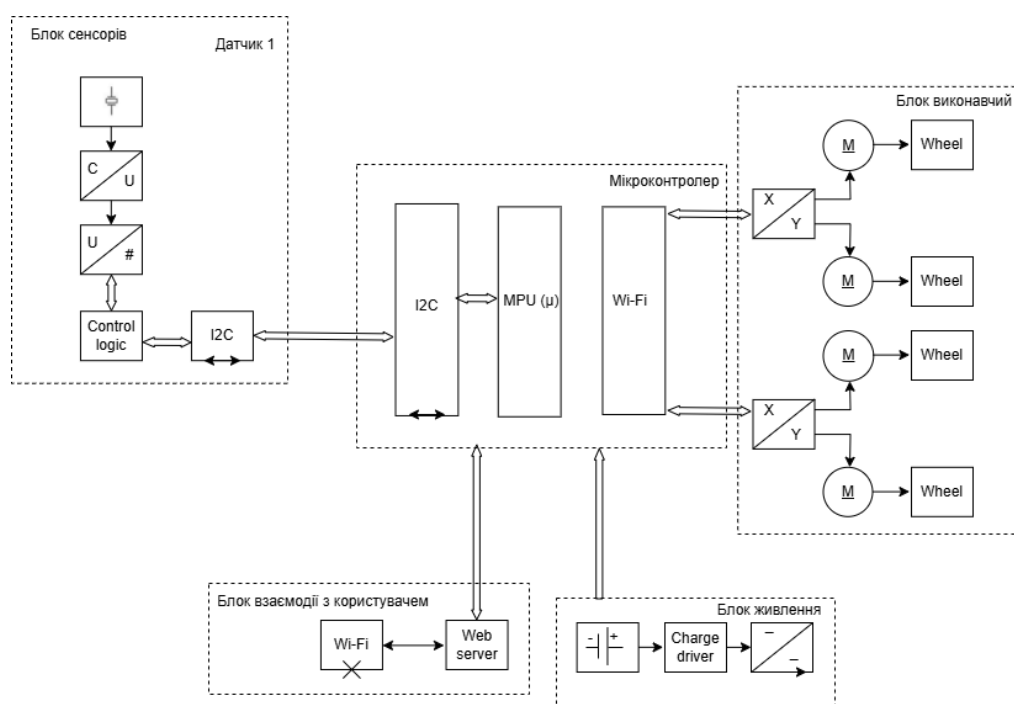


Рисунок 3.1 — Функціональна схема архітектури системи «Gelik 2.0»

Завершальним елементом архітектури є рівень енергозабезпечення, який гарантує стабільність та автономність роботи всієї платформи. Використання акумуляторної збірки конфігурації 2s2p забезпечує необхідну напругу та струм для силових приводів, а впровадження імпульсного понижуючого перетворювача для живлення логічної частини дозволяє ефективно ізолювати мікроконтролер від електричних завад, що генеруються двигунами. Усі вищеписані рівні взаємодіють між собою за подійною моделлю, утворюючи

цілісну систему із замкненим циклом керування, де швидкість руху платформи динамічно змінюється залежно від інформації, отриманої від датчика дистанції.

3.2 Вибір апаратної платформи

Процес вибору елементної бази для мобільної системи «Gelik 2.0» є фундаментальним етапом проєктування, оскільки від технічних характеристик вибраних модулів безпосередньо залежить стабільність виконання алгоритмів у реальному часі, енергоефективність системи та точність моніторингу дистанції. Кожен компонент підбирався з урахуванням необхідності забезпечення високої обчислювальної потужності для підтримки мережевого стеку та одночасної обробки сигналів від сенсорної периферії.

3.2.1 Обґрунтування вибору мікроконтролера ESP32-S3

Центральним обчислювальним ядром системи обрано мікроконтролер останнього покоління ESP32-S3-DevKitC-1. Дана платформа базується на високопродуктивному 32-бітному двоядерному процесорі Xtensa® LX7, який працює на тактовій частоті до 240 МГц. Вибір саме цієї модифікації замість базових моделей серії ESP32 або платформ Arduino обумовлений декількома критичними факторами:[10, 21]

Двоядерна архітектура: Дозволяє ефективно розподілити задачі. Одне ядро виділяється для підтримки бездротового стеку (Wi-Fi 2.4 GHz) та функціонування веб-сервера, тоді як друге ядро займається виключно задачами керування (генерування ШІМ-сигналів, обробка переривань від датчика HC-SR04).

Розширені можливості вводу-виводу (GPIO): Наявність 45 програмованих виводів дозволяє підключити всі необхідні модулі (два драйвери двигунів, датчик, реле, бузер) без використання додаткових розширювачів портів або мультиплексорів.

Апаратна підтримка ШІМ (PWM): Спеціалізований периферійний модуль LED Control (LEDC) дозволяє генерувати високоточні сигнали керування

швидкістю двигунів з розрядністю до 14 біт, що забезпечує плавний рух платформи при паркуванні.[10]

3.2.2 Вибір інтелектуальних драйверів двигунів TB6612FNG

Для забезпечення мобільності платформи «Gelіk 2.0», що приводиться в рух чотирма незалежними двигунами постійного струму, критично важливим є вибір силового каскаду, здатного ефективно комутувати значні струми без критичного перегріву. В сучасній аматорській та професійній робототехніці найбільш розповсюдженими рішеннями для керування малими та середніми моторами є модулі на базі мікросхем L298N та TB6612FNG. Проте для даного проєкту було обрано саме TB6612FNG, що зумовлено його сучасною архітектурою на базі польових транзисторів (MOSFET).[18]



Рисунок 3.2 – Інтелектуальний драйвер двигунів TB6612FNG

Основною проблемою застарілих драйверів, таких як L298N, є використання біполярних транзисторів у вихідних каскадах Н-моста. Це призводить до суттєвого падіння напруги (до 1.5–2 В) на самому драйвері, яка розсіюється у вигляді тепла. В умовах живлення від акумулятора 2s2p таке падіння напруги значно знижує ККД системи та зменшує максимальну швидкість двигунів. Натомість TB6612FNG має вкрай низький опір у відкритому стані, що дозволяє майже всю енергію акумулятора спрямовувати безпосередньо на обмотки двигунів.[18][18]

Для остаточного підтвердження доцільності вибору було проведено порівняльний аналіз технічних характеристик обох рішень, результати якого наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Порівняльний аналіз характеристик драйверів L298N та TB6612FNG

Параметр	L298N (Dual H-Bridge)	TB6612FNG (Dual H-Bridge)	Перевага для проєкту
Тип вихідних ключів	Біполярні транзистори	MOSFET-транзистори	TB6612FNG (вищий ККД)
Падіння напруги	Високе (1.5 – 2.5 В)	Низьке (~0.5 В при 1 А)	TB6612FNG (більше потужності на мотори)
Робочий струм	До 2 А на канал	До 1.2 А на канал	Обидва придатні
Тепловиділення	Дуже високе (потребує радіатор)	Мінімальне (не потребує радіатор)	TB6612FNG (компактність корпусу)
Логічна напруга	5 В	2.7 В – 5.5 В	TB6612FNG (сумісність з ESP32 3.3 В)
Габарити модуля	Великі (43x43 мм)	Компактні (20x20 мм)	TB6612FNG (легше розмістити в корпусі)
Режими роботи	Forward, Reverse, Stop	Forward, Reverse, Stop, Brake	TB6612FNG (миттєва зупинка в "PARK")

Візуалізація конструктивних відмінностей між двома типами силових ключів представлена на рисунку 3.3. Наведені принципові схеми Н-моста наочно демонструють різницю в падінні напруги на переходах транзисторів, що є ключовим фактором при виборі драйвера для мобільної платформи.

На наведеній схемі чітко видно принципову різницю в роботі силових каскадів:

Схема (а) демонструє архітектуру, характерну для драйвера L298N. Використання біполярних транзисторів призводить до значного падіння напруги на переходах, що візуалізується як теплові втрати. Це обмежує потужність, яка реально доходить до двигунів «Gelіk 2.0».

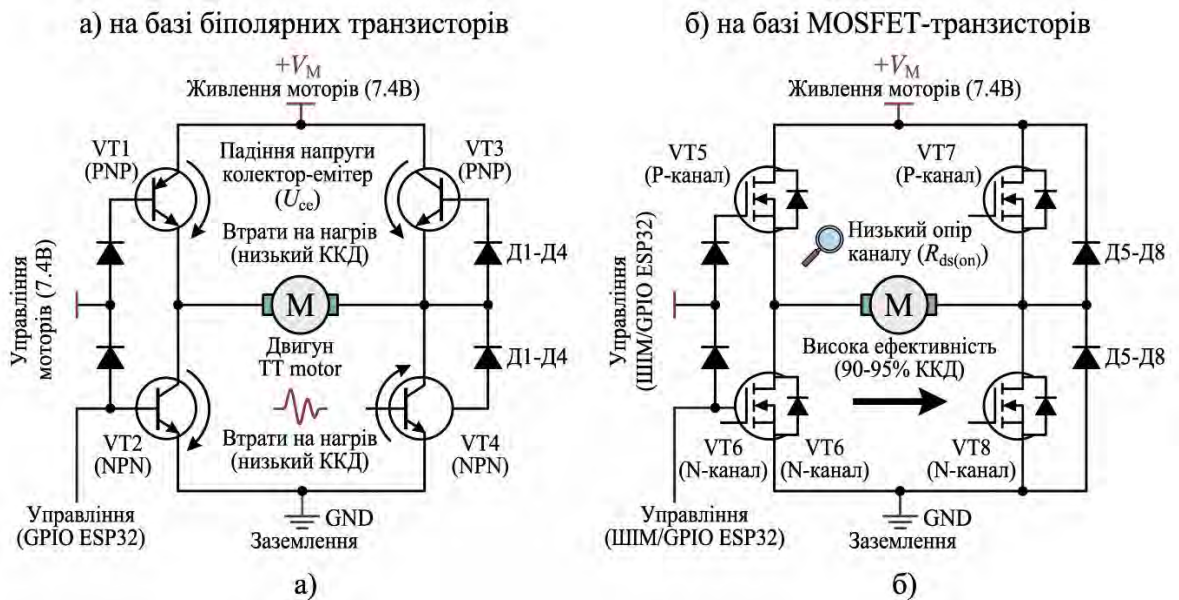


Рисунок 3.3 — Порівняльна схема силових ключів Н-моста: а) на базі біполярних транзисторів; б) на базі MOSFET-транзисторів

Схема (б) відображає архітектуру драйвера TB6612FNG. Завдяки використанню польових транзисторів (MOSFET) з низьким опором каналу, енергія акумулятора передається на мотори з мінімальними втратами, що забезпечує високий ККД та відсутність перегріву.

3.2.3 Аналіз засобів вимірювання дистанції та індикації

Важливим етапом проєктування системи моніторингу «Gelіk 2.0» є вибір засобів отримання інформації про зовнішнє середовище та методів сповіщення користувача про потенційну небезпеку. Враховуючи концепцію пристрою як імітатора автомобільного паркувального асистента, основна увага приділяється точності вимірювання на малих відстанях та оперативності звукового зворотного зв'язку.

Основним інструментом збору метричних даних у системі обрано ультразвуковий сенсор HC-SR04. [5]

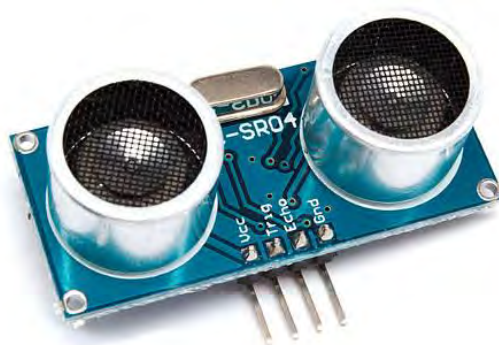


Рисунок 3.4 — Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04

Вибір ультразвукового датчика HC-SR04 обумовлений його стабільною роботою з об'єктами різної форми та фактури, що є важливим для умов паркування. Датчик працює на частоті 40 кГц та має кут огляду близько 15–30°, забезпечуючи виявлення перешкод не лише по осі руху, а й під невеликим кутом до неї [5, 11].

Принцип вимірювання ґрунтується на визначенні часу проходження ультразвукового імпульсу до перешкоди та назад. Завдяки високій продуктивності мікроконтролера ESP32-S3 система забезпечує точність вимірювання до 3 мм, що є достатнім для безпечного маневрування мобільної платформи [5, 10].

Для звукового оповіщення використано активний бузер із вбудованим генератором, який спрощує програмну реалізацію та виконує функцію інтерфейсу взаємодії з користувачем. Частота звукових сигналів збільшується зі зменшенням відстані до перешкоди, а при досягненні критичної дистанції 5 см подається безперервний сигнал.

Поєднання ультразвукового вимірювання та акустичної індикації забезпечує зручне керування платформою «Gelik 2.0» без необхідності постійного контролю через смартфон, а також мінімальну затримку між виявленням перешкоди та подачею попереджувального сигналу.

3.2.4 Проектування системи енергозабезпечення

Ефективність та автономність функціонування мобільної платформи «Gelik 2.0» безпосередньо залежать від якості проектування системи енергозабезпечення. Враховуючи наявність чотирьох тягових двигунів, які створюють значні пікові навантаження та електромагнітні завади, система живлення має забезпечувати не лише необхідну потужність, а й стабільність логічних рівнів для мікроконтролера ESP32-S3.

Основним джерелом енергії для платформи обрано акумуляторну збірку на базі літій-іонних елементів типорозміру 18650, з'єднаних за схемою 2s2p (2 послідовно, 2 паралельно). Дана конфігурація є оптимальною з огляду на наступні чинники:[20]Напруга: послідовне з'єднання двох елементів забезпечує номінальну напругу $U_{nom} = 7.4 \text{ В}$ (при повному заряді до 8.4 В), що ідеально відповідає робочому діапазону двигунів ТТ-серії та драйверів TB6612FNG.



Рисунок 3.5 — Схема з'єднання акумуляторної батареї конфігурації 2s2p

Ємність та струмовіддача: паралельне з'єднання двох гілок дозволяє подвоїти загальну ємність системи $C_{total} = C_1 + C_2$) та суттєво знизити внутрішній опір збірки, що дозволяє безпечно віддавати високі пускові струми, необхідні для одночасного старту чотирьох моторів.

Важливою особливістю системи є розділення живлення силової та логічної частин. Безпосереднє підключення мікроконтролера до шини живлення двигунів може призводити до виникнення імпульсних перешкод і просідань напруги під

час маневрування або блокування двигунів. Для забезпечення стабільної роботи електроніки використано імпульсний понижуючий DC-DC перетворювач [20].

Застосування DC-DC перетворювача замість лінійного стабілізатора обумовлене його високим ККД (90–95 %), що дозволяє суттєво зменшити втрати енергії та нагрів компонентів. Перетворювач забезпечує стабільну напругу 5 В для живлення ESP32-S3 та периферійних модулів.

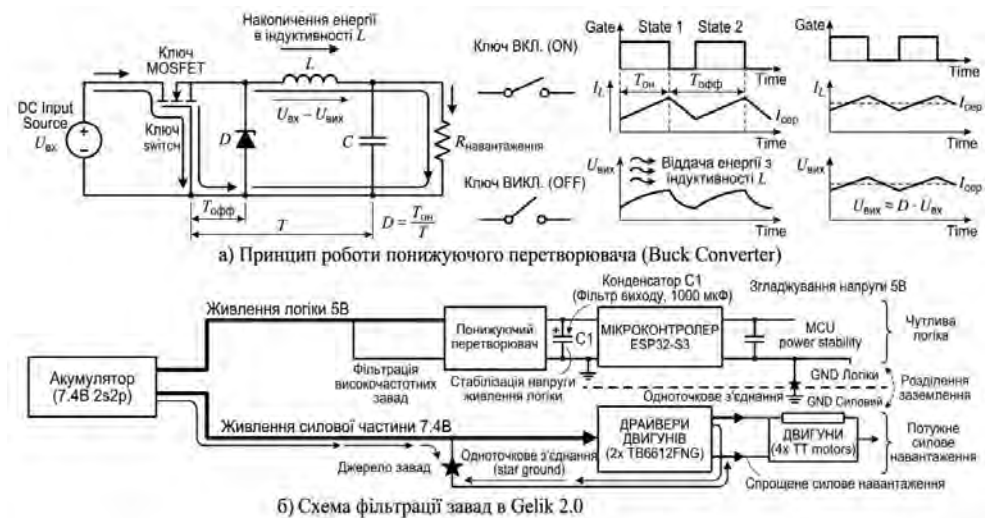


Рисунок 3.6 — Принцип роботи понижуючого перетворювача та схема фільтрації завад

Для забезпечення додаткової стабільності, на виході перетворювача встановлено електролітичні конденсатор великої ємності, який виконує роль фільтрів низьких частот, згладжуючи залишкові пульсації напруги. Такий підхід гарантує, що обчислювальне ядро контролера працюватиме без збоїв та перезавантажень навіть при екстремальних режимах роботи силової частини, що є ключовим показником надійності інтелектуального парктроніка «Gelik 2.0».

3.2.5 Проектування вузла керування освітленням

Для керування світлодіодними фарами в проєкті «Gelik 2.0» використано вузол комутації на базі транзистора BC547 та електромагнітного реле. Таке

рішення дозволяє керувати навантаженням, потужність якого перевищує допустимі параметри виходів мікроконтролера.

Керуючий сигнал із порту GPIO17 ESP32-S3 подається на базу транзистора через струмообмежувальний резистор. Емітер транзистора підключений до шини GND, а колектор — до входу керування релейного модуля [19]. При подачі високого логічного рівня транзистор відкривається та активує реле.

Комутація живлення фар здійснюється контактною групою реле: контакт NO підключений до позитивної лінії живлення фар, а контакт COM — до загальної шини системи. Така схема забезпечує надійне та безпечне керування освітленням за допомогою мікроконтролера.

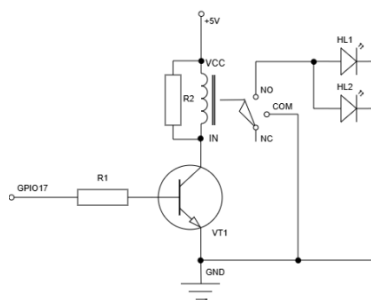


Рисунок 3.7 — Електрична принципова схема вузла керування фарами на базі BC547 та реле

Використання транзистора BC547 як драйвера релейного модуля забезпечує розділення силових і логічних кіл системи. Це підвищує надійність роботи вузла освітлення та захищає мікроконтролер від впливу перешкод і зворотних струмів, що можуть виникати під час перемикання реле.

3.3 Алгоритм визначення дистанції та логіка роботи системи

Програмне забезпечення «Gelik 2.0» розроблене у середовищі Arduino IDE для мікроконтролера ESP32-S3. Ключовою особливістю алгоритму є реалізація інтелектуального паркувального асистента, який автономно регулює швидкість руху та інтенсивність звукового оповіщення.

Для розрахунку відстані використовується метод Time-of-Flight (ToF). Хоча технічні характеристики сенсора HC-SR04 дозволяють виявляти об'єкти на відстані до 400 см, у даному проєкті основна увага зосереджена на ближній зоні (від 4 до 60 см). Це зумовлено специфікою роботи паркувального асистента, де критично важливою є точність саме при мінімальному наближенні до перешкоди.[5, 8]

При наближенні на відстань 4 см часовий інтервал між випромінюванням та отриманням сигналу становить всього:

$$t = 4 * 58 = 232 \text{ мкс}$$

Завдяки використанню мікроконтролера ESP32-S3 з тактовою частотою 240 МГц, система здатна обробляти такі надкороткі імпульси з високою дискретністю, що забезпечує стабільну роботу платформи навіть за декілька сантиметрів до зіткнення.

3.4 Алгоритм обробки даних сенсорів

Ефективність системи моніторингу «Gelik 2.0» залежить не лише від точності вимірювань, а й від інтелектуальної обробки отриманої інформації.

Опитування ультразвукового датчика HC-SR04 реалізовано у функції `readDistanceCm()`. На відміну від стандартних блокуючих методів, цей алгоритм використовує мікросекундні затримки `delayMicroseconds()` лише для формування стартового імпульсу на `TRIG_PIN` (GPIO 13). Основний час очікування відповіді контролюється функцією `pulseIn()` з жорстко встановленим таймаутом у 25000 мкс.[5, 10]

Важливим аспектом обробки є етап валідації даних. Ультразвукові датчики схильні до похибок, викликаних поглинанням звуку м'якими поверхнями або дзеркальним відбиттям від похилих площин. У коді передбачена перевірка: якщо функція `pulseIn()` повертає 0 (сигнал не повернувся в межах таймауту), функція повертає значення -1. Це критично для безпеки: алгоритм `updateParking()` ігнорує помилкові заміри та використовує останнє достовірне значення (`lastCm`), що запобігає різким ривкам або помилковим зупинкам платформи.

Для стабільної роботи системи «Gelik 2.0» впроваджено механізм неблокуючої затримки на основі системного таймера `millis()`. Опитування датчика відбувається суворо кожні 100 мс:[10]

```
if (now - lastMeasureMs >= 100)
{ lastMeasureMs = now; int cm = readDistanceCm();
  if (cm != -1) lastCm = cm;
}
```

Така частота дискретизації (10 Гц) є оптимальною: вона достатньо висока, щоб робот встиг зреагувати на перешкоду при швидкості руху до 0.5 м/с, і водночас дозволяє уникнути накладання відлунь від попередніх вимірювань (так званий ефект «акустичного шуму» у приміщенні).

Для досягнення ефекту «плавного наближення», реалізовано функцію `speedForDistance()`. Вона використовує метод лінійного мапування значень. Коли відстань L знаходиться в межах від $L_{[10]stop}$ (5 см) до L_{start} (60 см), швидкість двигунів розраховується за формулою:

$$V(L) = Vmin + \frac{(L - (L_{stop} + 1)) * (Vmax - Vmin)}{L_{start} - (L_{stop} + 1)}$$

Цей підхід забезпечує нелінійне сприйняття руху: чим ближче перешкода, тим вищий момент опору створюється двигунами за рахунок зменшення ШІМ-сигналу, що дозволяє робоплатформі зупинитися максимально м'яко, без інерційного удару.

Особливу складність при програмуванні становила реалізація звукового супроводу без зупинки основного циклу програми. Використання стандартної функції `delay()` призвело б до «замерзання» управління моторами. Тому логіка бузера побудована на асинхронному перемиканні станів.

Функція `beepPeriodMsForDistance()` розраховує тривалість повного циклу «звук + пауза». З наближенням до об'єкта цей період скорочується з 900 мс до 120 мс. Зміна стану піна `BUZZ_PIN` відбувається лише тоді, коли поточний час `millis()` перевищує запланований час наступного перемикавання:

```
if (now >= nextBeepToggleMs) {  
  buzzerState = !buzzerState;  
  digitalWrite(BUZZ_PIN, buzzerState ? HIGH : LOW);  
  nextBeepToggleMs = now + (period / 2);  
}
```

Це дозволяє досягти ефекту «розумного парктроніка», де швидкість пицання прямо вказує користувачеві на ступінь небезпеки зіткнення, не впливаючи при цьому на плавність ходу самої платформи.

3.5 Інтеграція системи у мобільну платформу

Основою платформи є чотириколісне шасі з незалежним приводом на кожне колесо. Використання чотирьох мотор-редукторів типу ТТ забезпечує високу маневровість і можливість виконання розвороту на місці [1].

Під час компонування елементів було забезпечено раціональний розподіл маси. Акумуляторну збірку 2s2p розміщено в нижній центральній частині шасі, що сприяє зниженню центру ваги та підвищенню стійкості платформи. Ультразвуковий датчик HC-SR04 встановлено в передній частині конструкції для ефективного виявлення перешкод різної висоти [5].

Мікроконтролер ESP32-S3 і драйвери двигунів TB6612FNG розташовані в центральній частині шасі за акумулятором. Роз'єми USB Type-C для заряджання та кнопка живлення виведені на корпус платформи для зручності експлуатації [10, 18].

Електрична інтеграція платформи виконана відповідно до розробленої функціональної схеми з урахуванням вимог надійності та завадостійкості. Для

підключення акумуляторної збірки та драйверів двигунів використано багатожильні мідні провідники, а всі силові з'єднання виконано методом пайки з подальшою ізоляцією термозапобіжними трубками.

Для зменшення впливу електромагнітних завад сигнальні лінії ультразвукового датчика HC-SR04 прокладено окремо від силових проводів двигунів, що підвищує точність вимірювання відстані.

Світлодіодні фари встановлено у передній частині кузова та підключено через релейний вузол керування. Живлення освітлення здійснюється окремою лінією 7,4 В, що забезпечує стабільну яскравість незалежно від навантаження на логічну частину системи.



Рисунок 3.8 — Демонстрація роботи системи освітлення

Після завершення складання було виконано прошивку мікроконтролера та перевірку роботи мережевої підсистеми. Під час запуску система послідовно виконує самодіагностику периферійних пристроїв, ініціалізацію точки доступу Wi-Fi та запуск веб-сервера з маршрутами керування рухом платформи.

Для бездротового підключення створюється Wi-Fi мережа з параметрами **SSID «RobotCar_Gelik»** та **паролем «12345678»**, після чого користувач отримує доступ до веб-інтерфейсу через смартфон. Після завантаження сторінки керування система забезпечує передачу команд руху, регулювання швидкості та роботу режиму паркування.

Програмне забезпечення автоматично пов'язує значення регулятора швидкості з параметрами ШІМ керування двигунами, а дані ультразвукового датчика — зі звуковою індикацією. Це забезпечує узгоджену роботу всіх підсистем та готовність платформи до експлуатації одразу після ввімкнення [10].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У третьому розділі розроблено архітектуру та реалізовано апаратно-програмне забезпечення мобільної робототехнічної платформи «Gelik 2.0», призначеної для виконання функцій інтелектуального паркувального асистента. Проведено обґрунтування вибору основних апаратних компонентів, розроблено структурну та функціональну схеми системи, а також виконано інтеграцію всіх модулів у єдиний програмно-апаратний комплекс.

У результаті виконано вибір мікроконтролера ESP32-S3 як центрального обчислювального вузла системи, що забезпечує підтримку бездротового зв'язку Wi-Fi, обробку даних у режимі реального часу та реалізацію вебінтерфейсу керування. Для керування приводами платформи використано драйвери TB6612FNG, які характеризуються високим ККД, низькими втратами потужності та сумісністю з логічними рівнями мікроконтролера.

Розроблено систему вимірювання дистанції на основі ультразвукового датчика HC-SR04 та підсистему звукового оповіщення, що дозволяє реалізувати функцію контролю наближення до перешкод. Запропоновано алгоритми визначення відстані, фільтрації помилкових вимірювань, адаптивного регулювання швидкості руху та формування звукових сигналів залежно від поточної дистанції до об'єкта.

Спроектовано систему енергозабезпечення на базі акумуляторної збірки 2s2p та імпульсного DC-DC перетворювача, що забезпечує стабільне живлення силової та логічної частин системи. Також розроблено вузол керування світлодіодними фарами на основі транзисторного ключа та релейного модуля, який гарантує безпечну комутацію навантаження та захист мікроконтролера від електричних перешкод.

Виконано фізичну інтеграцію всіх апаратних компонентів на мобільному шасі з урахуванням вимог щодо розподілу маси, електромагнітної сумісності та надійності електричних з'єднань.

РОЗДІЛ 4

Програмна реалізація системи.

У даному розділі описано розробку програмного забезпечення для мобільної платформи. Основна увага приділена архітектурі коду, реалізації алгоритмів обробки сенсорних даних та створенню вебінтерфейсу для дистанційного керування в реальному часі.

4.1 Вибір середовища розробки

Для розробки програмного забезпечення мобільної платформи було проаналізовано доступні середовища розробки для мікроконтролерів ESP32. Серед основних варіантів розглядалися офіційний фреймворк ESP-IDF та екосистема Arduino. Для реалізації проєкту обрано **Arduino IDE** з використанням ядра **arduino-esp32**, що забезпечує швидке розроблення, зручне налагодження та широку підтримку бібліотек [10, 21].

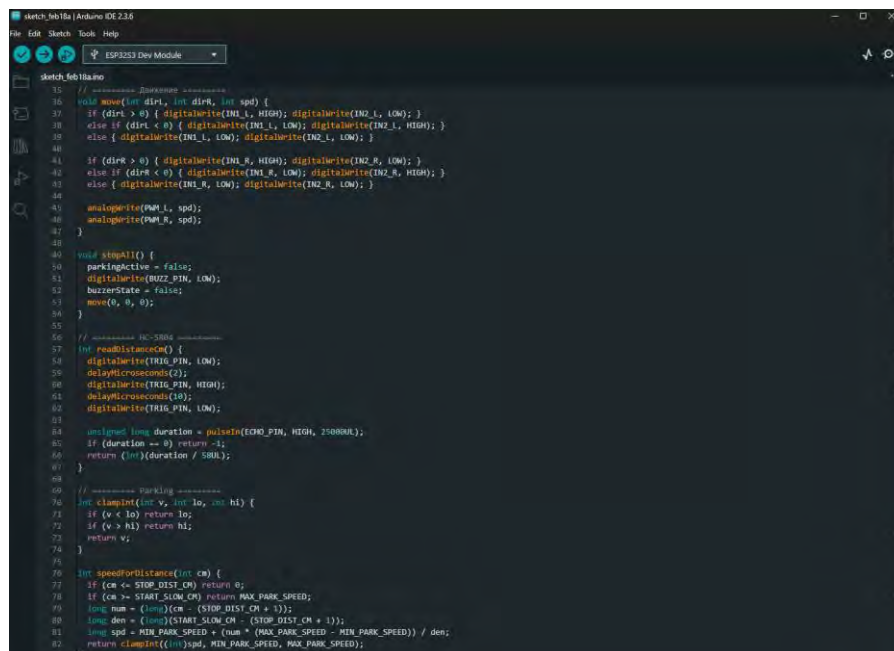


Рисунок 4.1 — Середовище розробки Arduino IDE з відкритим проєктом

Цей вибір обґрунтований низкою технічних та практичних переваг, які є критичними для реалізації систем реального часу з вебінтерфейсом:

Перевагами використання Arduino IDE є високий рівень абстракції, наявність великої кількості готових бібліотек та повна підтримка апаратних можливостей ESP32-S3. Це дозволяє швидко реалізовувати функції керування двигунами, опитування датчиків, організацію Wi-Fi-з'єднання та роботу вебсервера без необхідності низькорівневого програмування.

Використання бібліотек **WiFi.h** та **WebServer.h** забезпечує надійну реалізацію мережесих функцій, а підтримка архітектури ESP32-S3 створює можливість ефективного розподілу обчислювальних задач між різними процесами. Крім того, значна кількість документації та готових прикладів спрощує розробку та налагодження програмного забезпечення.

Порівняно з ESP-IDF, середовище Arduino IDE забезпечує швидше створення прототипів при збереженні можливості реалізації складних алгоритмів керування мовою C++. Це робить його оптимальним інструментом для розробки програмного забезпечення платформи «Gelik 2.0» [22].

4.2 Структура програмного забезпечення

Програмне забезпечення системи побудовано за модульним принципом відповідно до стандартної архітектури Arduino-сумісних мікроконтролерів (рис. 4.2). Такий підхід забезпечує ефективну взаємодію між мережевими сервісами та алгоритмами керування платформою без взаємного блокування процесів.

Структура програми включає два основні блоки: функцію **setup()**, яка виконує початкове налаштування периферії, запуск точки доступу Wi-Fi та вебсервера, і функцію **loop()**, що забезпечує безперервну обробку мережесих запитів та виконання алгоритмів паркування.

Логіка роботи реалізована через систему глобальних констант і змінних, колбек-функцій для обробки команд користувача та окремих функціональних модулів. Така структура спрощує супровід програмного коду, забезпечує його масштабованість та ізолює низькорівневу взаємодію з апаратними

компонентами, зокрема драйверами двигунів TB6612FNG, датчиком відстані та виконавчими пристроями [18].

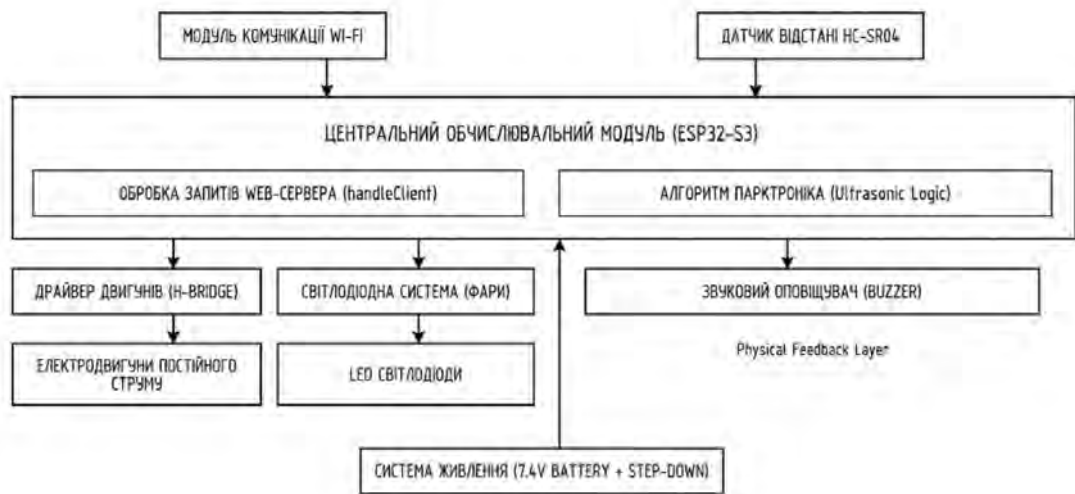


Рисунок 4.2 — Ієрархічна структура програмного забезпечення проекту

Важливою особливістю програмної архітектури є використання неблокуючих алгоритмів для звукової індикації та вимірювання дистанції. Замість функції `delay()` застосовано механізм контролю часу на основі системного таймера `millis()`, що дозволяє одночасно обслуговувати HTTP-запити, виконувати вимірювання відстані та керувати звуковими сигналами парктроніка без зупинки основного циклу програми [23].

Модульна структура програмного забезпечення забезпечує високу гнучкість і масштабованість системи. За потреби до проекту можуть бути додані нові функціональні можливості без внесення суттєвих змін до існуючих програмних модулів та мережевої підсистеми.

4.3 Реалізація алгоритму вимірювання дистанції

Основним функціональним вузлом системи у режимі «PARK» є алгоритм прецизійного вимірювання відстані до перешкоди. Програмна реалізація цього вузла базується на методі ехолокації (Time-of-Flight), де мікроконтролер обчислює час між випромінюванням ультразвукового пакету та детектуванням відбитої хвилі.

Для вимірювання відстані у функції **readDistanceCm()** використовується послідовність керування лініями **TRIG_PIN** та **ECHO_PIN**. На початку формується стартовий імпульс тривалістю 10 мкс на вході **TRIG_PIN**, який ініціює випромінювання ультразвукового сигналу датчиком HC-SR04.

Приймання відбитого сигналу здійснюється за допомогою функції **pulseIn(ECHO_PIN, HIGH, 25000UL)**. Встановлений таймаут 25 мс обмежує максимальну дальність вимірювання приблизно 4 м та запобігає блокуванню програми у випадку відсутності відбитого сигналу. Такий підхід підвищує надійність роботи системи та забезпечує стабільне функціонування алгоритмів керування платформою [24].

Математичне перетворення тривалості імпульсу t у відстань L (см) здійснюється за константою 58, що виведена з швидкості звуку у повітрі:

$$L = \frac{t}{58}$$

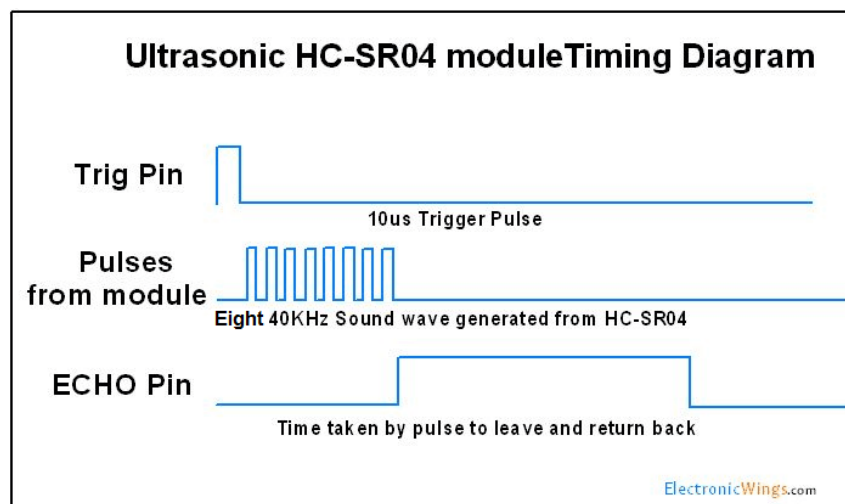


Рисунок 4.3 — Часова діаграма керуючих сигналів HC-SR04: TRIG (10 мкс) та ECHO (час польоту)[26]

Особливістю робоплатформи є не просто фіксація відстані, а динамічна зміна тяги двигунів. Це реалізовано у функції **speedForDistance(int cm)**. Код

використовує метод лінійної інтерполяції для плавного переходу між максимальною швидкістю паркування ($\text{MAX_PARK_SPEED} = 180$) та мінімальною ($\text{MIN_PARK_SPEED} = 90$).

Розрахунок виконується за формулою, інтегрованою в код:

$$V_{out} = V_{min} + \frac{L_{curr} - (L_{stop} + 1)) * (V_{max} - V_{min})}{L_{start} - (L_{stop} + 1)}$$

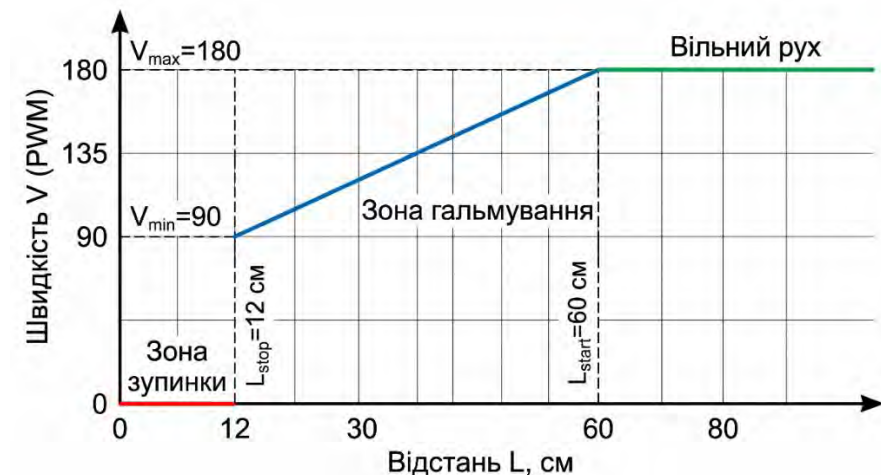


Рисунок 4.4 — Графік залежності швидкості двигунів від відстані до перешкоди

де L_{curr} — поточна відстань, L_{start} — дистанція початку гальмування (60 см), L_{stop} — дистанція повної зупинки (5 см). Використання цілочисельної арифметики замість операцій з плаваючою точкою (float) дозволяє ESP32-S3 виконувати обчислення за мінімальну кількість тактів, що підвищує частоту оновлення системи керування [25].

Для підвищення достовірності вимірювань у функції **updateParking()** реалізовано механізм перевірки отриманих даних. У разі повернення функцією **readDistanceCm()** помилкового значення (-1) система ігнорує такий результат та використовує останнє коректне значення відстані. Це дозволяє уникнути помилкових реакцій на короточасні збої вимірювання.

Опитування ультразвукового датчика здійснюється з інтервалом 100 мс, що запобігає впливу багаторазових відбиттів ультразвукових хвиль та підвищує стабільність роботи системи в умовах закритих приміщень.

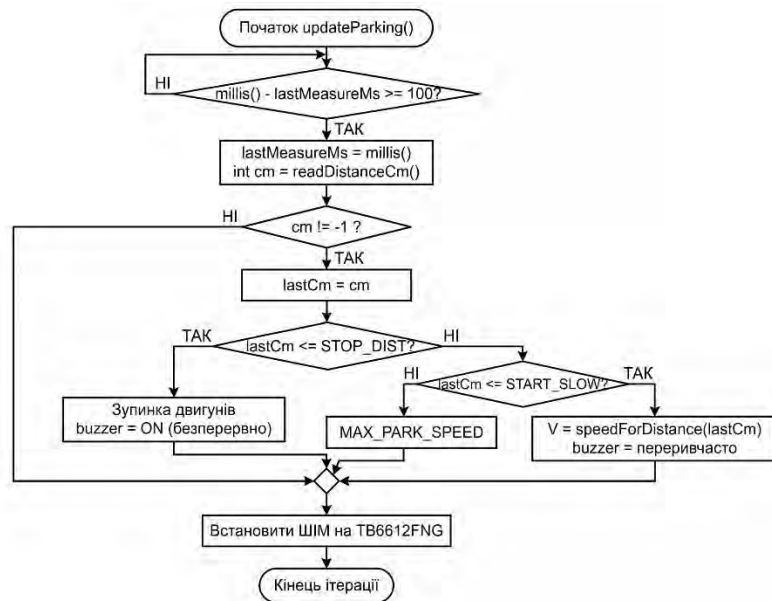


Рисунок 4.5 — Блок-схема алгоритму функції updateParking()

Описана програмна реалізація алгоритму вимірювання дистанції забезпечує надійну та точну роботу парктроніка проекту у реальних умовах. Поєднання апаратних можливостей мікроконтролера ESP32-S3, оптимізованої часової послідовності керування датчиком HC-SR04 та неблокуючої архітектури головного циклу дозволяє системі одночасно виконувати задачі вимірювання відстані, керування приводами та обслуговування веб-клієнта з мінімальними затримками. Обраний підхід до фільтрації даних через перевірку валідності та часове вікно 100 мс забезпечує стійкість системи до хибних спрацювань і стабільну роботу у середовищах з акустичним шумом.

4.4 Інтерфейс взаємодії з користувачем

Для платформи «Gelіk 2.0» розроблено вебінтерфейс керування, доступний через будь-який браузер на смартфоні, планшеті або комп'ютері. Такий підхід забезпечує кросплатформеність системи та усуває необхідність створення окремих застосунків для різних операційних систем.

Використання вебтехнологій спрощує підключення до робота та забезпечує зручне керування в режимі реального часу.

Вебінтерфейс реалізовано за принципом SPA (Single Page Application), що забезпечує швидке завантаження та мінімізує мережевий трафік під час керування.

Система працює за клієнт-серверною моделлю: мікроконтролер ESP32-S3 виконує функції вебсервера та створює локальну Wi-Fi мережу «RobotCar_Gelik», а браузер користувача відображає інтерфейс і надсилає команди за допомогою Fetch API без перезавантаження сторінки.

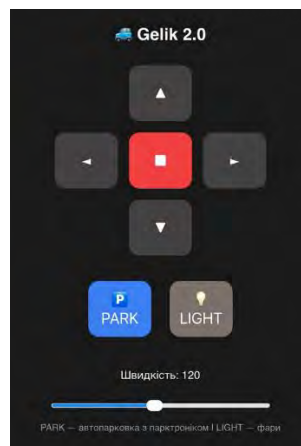


Рисунок 4.6 — Веб-інтерфейс керування робоплатформою

Дизайн вебінтерфейсу, представлений на Рисунку 4.6, розроблений з урахуванням специфіки сенсорного керування. Для стилізації використано мову CSS3, що дозволило створити сучасний вигляд без використання важких графічних файлів.

Основні елементи інтерфейсу:

Блок навігації (D-pad): Центральний елемент керування рухом. Кнопки мають розмір 90x80 пікселів, що є оптимальним для великого пальця руки.

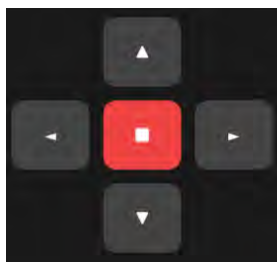


Рисунок 4.7 — Вигляд блоку навігації (D-pad)

Панель спеціальних режимів: Містить кнопки «PARK» (синій колір) та «LIGHT» (жовтий колір). Кнопка освітлення має динамічний клас `.on`, який додає ефект неоновового світіння (`box-shadow: 0 0 20px #fbbf24`), візуально підтверджуючи активацію фар.



Рисунок 4.8 — Вигляд задіяної кнопки увімкнення фар

Блок контролю швидкості: Реалізований за допомогою повзунка (слайдера) та текстового поля, що відображає поточне значення ШІМ (від 0 до 255). Це дозволяє оператору тонко налаштовувати тягу двигунів залежно від типу покриття.

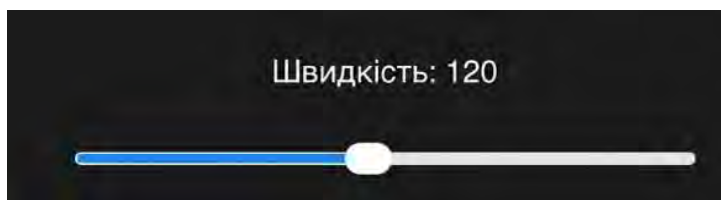


Рисунок 4.9 — Слайдер налаштування тяги двигунів

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У четвертому розділі виконано розробку програмного забезпечення мобільної платформи «Gelik 2.0», реалізовано алгоритми керування рухом, вимірювання дистанції та взаємодії користувача із системою через вебінтерфейс. Обране середовище Arduino IDE забезпечило швидке створення та налагодження програмного забезпечення, а використання бібліотек для ESP32-S3 дозволило реалізувати мережеві функції та керування апаратними ресурсами мікроконтролера.

У процесі розробки створено модульну архітектуру програмного забезпечення, яка базується на використанні функцій `setup()` та `loop()`, системи обробників подій і окремих функціональних модулів. Такий підхід забезпечує масштабованість програмного коду, спрощує його супровід та дозволяє інтегрувати нові функціональні можливості без зміни основної структури системи.

Реалізовано алгоритм вимірювання відстані на основі ультразвукового датчика HC-SR04 із використанням методу Time-of-Flight. Розроблено механізми фільтрації помилкових вимірювань, контролю часу виконання операцій та адаптивного регулювання швидкості руху залежно від відстані до перешкоди.

Для дистанційного керування платформою розроблено кроссплатформний вебінтерфейс, реалізований за технологією SPA. Вебінтерфейс забезпечує керування рухом, налаштування швидкості, активацію режиму автоматичного паркування та керування освітленням через будь-який сучасний браузер без встановлення додаткового програмного забезпечення.

Отримані результати підтверджують працездатність розробленого програмного забезпечення та його здатність забезпечувати стабільне функціонування мобільної платформи в режимах дистанційного керування і автоматичного паркування. Розроблена програмна архітектура є достатньо гнучкою для подальшого розширення функціональних можливостей системи та впровадження додаткових інтелектуальних алгоритмів керування.

РОЗДІЛ 5.

ТЕСТУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ

Метою цього розділу є проведення експериментальних досліджень розробленої системи та оцінка її ефективності. У ході випробувань аналізуються точність роботи режиму «PARK», динаміка зміни швидкості під час наближення до перешкоди та швидкодія вебінтерфейсу керування.

Результати експериментів дозволяють підтвердити працездатність прототипу та оцінити відповідність розробленої системи вимогам технічного завдання.

5.1 Методика експериментального дослідження

Для підтвердження працездатності та оцінки ефективності системи автоматичного паркування мобільної платформи «Gelik 2.0» проведено серію експериментальних досліджень.

Метою випробувань було визначення точності позиціонування платформи в режимі «PARK», оцінка стабільності роботи ультразвукового датчика HC-SR04 під час наближення до перешкоди та перевірка надійності бездротового керування через мережу Wi-Fi.

Експериментальний стенд було розгорнуто у закритому приміщенні за стабільних умов навколишнього середовища (температура 20 °C, відносна вологість 55 %). Контроль мікрокліматичних параметрів є важливим, оскільки швидкість поширення ультразвукових хвиль залежить від температури повітря та впливає на точність вимірювання відстані.

$$v = 331.5 + 0.6 * T$$

За поточної температури швидкість звуку становила $v \approx 343.5$ м/с, що повністю відповідає програмній константі перерахунку часових інтервалів у метричні одиниці $L = T_{\text{echo}} / 58$.

В якості об'єкта відбиття (перешкоди) було використано вертикальну плоску поверхню з високим коефіцієнтом акустичного відбиття (дерев'яний щит

щільної структури з габаритними розмірами 50×50 см, встановлений перпендикулярно до вектору руху мобільної платформи. Покриттям ходової поверхні слугував однорідний гладкий ламінат, що дозволило зафіксувати базові параметри механічного вибігу та ковзання коліс при гальмуванні.



Рисунок 5.1 — Схема експериментального стенда для дослідження алгоритму автопаркування

Зовнішній вигляд зібраного прототипу мобільної платформи «Gelіk 2.0», підготовленого до експериментальних досліджень, наведено на рисунку 5.2. Платформа розміщена на поверхні лабораторного стенда, що забезпечує стабільні умови руху під час проведення випробувань. На передній частині конструкції встановлено ультразвуковий датчик HC-SR04, який виконує функцію вимірювання відстані до перешкод та є основним сенсорним елементом системи автоматичного паркування.

Для оцінювання точності роботи системи було використано еталонну механічну рулетку з ціною поділки 1 мм та похибкою $\pm 0,5$ мм, за допомогою якої визначалась фактична відстань між платформою та перешкодою.

Контроль роботи програмної частини здійснювався через монітор послідовного порту Arduino IDE, підключений до мікроконтролера ESP32-S3 через інтерфейс USB-UART зі швидкістю передачі даних 115200 бод. За його

допомогою реєструвалися значення відстані, розраховані програмним забезпеченням на основі даних ультразвукового датчика HC-SR04.



Рисунок 5.2 — Загальний вигляд мобільної платформи «Gelik 2.0» у зоні зупинки, після відпрацювання системи паркування.

Для оцінки мережевої швидкодії використовувався веб-інспектор браузера (вкладка **Network**), який дозволяв реєструвати час виконання HTTP-запитів між клієнтом і вбудованим вебсервером.

Експеримент проводився шляхом запуску платформи з початкової відстані 100 см до перешкоди. Після підключення до мережі «**RobotCar_Gelik**» та завантаження вебінтерфейсу за адресою **192.168.4.1** активувався режим «**PARK**», що запускав алгоритм автоматичного паркування. У процесі руху контролювалися зміна швидкості платформи та робота звукової індикації залежно від відстані до перешкоди.

Після автоматичної зупинки фіксувалися значення дистанції, отримані програмно, та фактична відстань до перешкоди, виміряна рулеткою. Для забезпечення статистичної достовірності експеримент повторювався 10 разів за однакових умов [27].

Отримані результати дозволяють оцінити точність вимірювання дистанції, інерційний вибіг платформи, динаміку роботи приводів та надійність системи автоматичного паркування.

Структуру фіксації експериментальних параметрів представлено у таблиці

5.1

Таблиця 5.1

Результати експериментальних досліджень системи автопаркування платформи

Номер досліджу	Початкова відстань, см	Програмний поріг STOP_DIST_CM, см	Програмне значення L_prog, см	Фактична відстань L_fact, см	Абсолютна похибка ΔL , см	Мережева затримка (Latency), мс
1	100	5	5	5.2	0.2	24
2	100	5	5	5.0	0.0	31
3	100	5	5	5.1	0.1	19
4	100	5	5	5.4	0.4	42
5	100	5	5	5.0	0.0	22
6	100	5	5	5.3	0.3	28
7	100	5	5	5.0	0.0	35
8	100	5	5	5.1	0.1	21
9	100	5	5	5.2	0.2	26
10	100	5	5	5.0	0.0	33
Середнє	100	5	5	5.13	0.13	28.1

5.2 Результати тестування

Відповідно до розробленої та описаної у підрозділі 5.1 методики експериментальних досліджень, було виконано серію з 10 контрольних заїздів мобільної платформи «Gelik 2.0» у режимі автономного паркування «PARK». Випробування проводилися після завантаження фінальної версії програмного забезпечення, в якій було оптимізовано швидкісні характеристики двигунів ($MAX_PARK_SPEED = 120$, $MIN_PARK_SPEED = 65$) та встановлено цільову програмну дистанцію зупинки $STOP_DIST_CM = 5$ см.

Під час кожного досліджу фіксувалися два ключові просторові показники: дистанція, яку зафіксував мікроконтролер ESP32-S3 за допомогою

ультразвукового сенсора безпосередньо перед надсиланням команди на зупинку двигунів (L_{prog}), та фактична відстань від бампера до перешкоди, виміряна за допомогою еталонної механічної рулетки після повної зупинки платформи (L_{fact}).

На основі отриманих даних обчислювалася абсолютна похибка позиціонування за формулою:

$$\Delta L = |L_{fact} - L_{prog}|$$

Зведені результати вимірювань просторових параметрів та мережевої затримки бездротового тракту для всіх 10 дослідів представлено в таблиці 5.1.

Додатково проводився моніторинг роботи вбудованого HTTP-сервера за допомогою інструментів розробника браузера. Вимірювався час відгуку на асинхронні запити, що надсилалися через **Fetch API**.

За результатами експерименту затримка передачі даних перебувала в межах 19–42 мс, а середнє значення становило 28,1 мс. Випадків втрати пакетів або перевищення затримки понад 50 мс не зафіксовано. Отримані результати підтверджують достатню продуктивність вебсервера на базі ESP32-S3 для забезпечення керування платформою в режимі реального часу [28].

Важливим етапом випробувань стала перевірка роботи системи звукової індикації під час наближення платформи до перешкоди. Встановлено, що при відстані понад 60 см бузер перебував у неактивному стані та не генерував звукових сигналів.

Після досягнення межі **START_SLOW_CM = 60 см** система починала формувати переривчасті звукові сигнали з великою тривалістю пауз між ними. У міру зменшення відстані частота сигналів поступово зростала, забезпечуючи оператору інтуїтивне уявлення про ступінь наближення до перешкоди.

При досягненні критичної дистанції **15 см** алгоритм переводив бузер у режим безперервного звучання, сигналізуючи про вхід платформи в небезпечну зону. Після автоматичної зупинки на відстані **5 см** від перешкоди звукова індикація вимикалася.

Результати випробувань підтвердили коректну роботу алгоритму акустичного оповіщення та його повну відповідність логіці функціонування сучасних паркувальних систем, забезпечуючи ефективний звуковий зворотний зв'язок для оператора.

5.3 Аналіз точності вимірювань

Статистична обробка результатів експерименту дозволила оцінити точність та стабільність роботи системи автоматичного паркування. За результатами десяти випробувань середня фактична відстань зупинки становила 5,13 см, що лише на 0,13 см відрізняється від заданого порога зупинки 5 см. Це свідчить про високу точність налаштування алгоритму плавного сповільнення та мінімальний вплив інерційного вибігу платформи.

Розраховане середньоквадратичне відхилення становило близько 0,14 см, що підтверджує високу повторюваність результатів та стійкість системи до випадкових зовнішніх впливів. Максимальне відхилення було зафіксовано на рівні 0,4 см, що пояснюється дискретним характером опитування ультразвукового датчика з періодом 100 мс.

Під час випробувань не виявлено збоїв у роботі ультразвукового датчика HC-SR04 навіть на мінімальних відстанях. Використання механізму перевірки достовірності вимірювань та ігнорування помилкових значень забезпечило стабільну роботу системи без хибних спрацювань.

Отримані результати підтверджують, що розроблена система забезпечує високу точність позиціонування, надійну роботу алгоритму автоматичного паркування та відповідає вимогам, які висуваються до сучасних мобільних робототехнічних комплексів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

У п'ятому розділі проведено експериментальні дослідження мобільної платформи «Gelik 2.0» з метою оцінки ефективності роботи системи автоматичного паркування, точності вимірювання відстані та швидкодії бездротового керування. Результати випробувань підтвердили працездатність усіх функціональних підсистем розробленого комплексу.

У ході досліджень встановлено, що система забезпечує високу точність позиціонування під час роботи в режимі «PARK». За результатами десяти експериментальних заїздів середня фактична відстань зупинки становила 5,13 см при заданому програмному значенні 5 см, а середня абсолютна похибка не перевищувала 0,13 см. Це підтверджує ефективність алгоритму адаптивного сповільнення та мінімальний вплив інерційного вибігу платформи.

Статистична обробка експериментальних даних показала високу стабільність роботи системи. Середньоквадратичне відхилення результатів становило близько 0,14 см, а максимальне відхилення не перевищило 0,4 см. Отримані показники свідчать про хорошу повторюваність результатів та стійкість системи до зовнішніх збурень.

Перевірка роботи бездротового каналу зв'язку показала, що середній час відгуку вебінтерфейсу становить 28,1 мс, при цьому втрати пакетів або критичних затримок не зафіксовано. Це підтверджує можливість ефективного дистанційного керування платформою в режимі реального часу.

Під час випробувань також підтверджено коректну роботу алгоритму звукового оповіщення та стабільне функціонування ультразвукового датчика HC-SR04 у всьому робочому діапазоні відстаней. Отримані результати свідчать про відповідність розробленої системи вимогам технічного завдання та можливість її використання як основи для подальшого розвитку інтелектуальних мобільних робототехнічних комплексів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті вирішено актуальне завдання розроблення системи автоматичного моніторингу дистанції для мобільної робототехнічної платформи. Проведений аналіз сучасних засобів вимірювання відстані та мобільних робототехнічних систем показав, що для навчальних і дослідницьких платформ доцільним є використання ультразвукових сенсорів у поєднанні з мікроконтролерними засобами керування, що забезпечують необхідний баланс між вартістю, точністю та функціональністю.

У роботі досліджено основні технології вимірювання дистанції, виконано порівняльний аналіз ультразвукових, інфрачервоних, лазерних та візуальних систем контролю відстані. За результатами аналізу для реалізації проєкту обрано ультразвуковий датчик HC-SR04 та мікроконтролер ESP32-S3, що забезпечують достатню точність вимірювань, швидкодію та можливість бездротового керування через мережу Wi-Fi.

Розроблено архітектуру системи автоматичного моніторингу дистанції, що включає сенсорний модуль, підсистему обробки даних, систему керування приводами, вузол звукового та світлового оповіщення, а також вебінтерфейс користувача. Виконано проєктування апаратної частини мобільної платформи, розроблено систему живлення, вузол керування освітленням та реалізовано інтеграцію всіх компонентів на єдиному шасі.

Створено програмне забезпечення на базі середовища Arduino IDE, яке забезпечує зчитування та обробку даних ультразвукового датчика, реалізацію алгоритму автоматичного паркування, адаптивне регулювання швидкості руху, звукову індикацію небезпечного наближення до перешкод і дистанційне керування через веббраузер. Застосування неблокуючих алгоритмів дозволило забезпечити одночасне виконання функцій вимірювання, керування та мережевої взаємодії в режимі реального часу.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність та ефективність розробленої системи. Середня фактична відстань зупинки платформи становила 5,13 см при заданому пороговому значенні 5 см, а середня

абсолютна похибка не перевищила 0,13 см. Отримані результати свідчать про високу точність позиціонування та стабільність роботи алгоритму автоматичного паркування. Додатково встановлено, що середній час відгуку вебінтерфейсу становить 28,1 мс, що забезпечує комфортне дистанційне керування платформою в режимі реального часу.

Отримані результати підтверджують відповідність розробленої системи поставленим вимогам та демонструють можливість її подальшого розвитку шляхом інтеграції додаткових сенсорів, алгоритмів автономної навігації, комп'ютерного зору та елементів штучного інтелекту. Розроблена мобільна платформа може бути використана як навчальний, дослідницький або демонстраційний комплекс для вивчення сучасних технологій робототехніки, автоматизації та бездротових систем керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2011. 453 p.
2. Auat Cheein F. A., Carelli R. Agricultural Robotics: Unmanned Robotic Service Units in Agricultural Tasks. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2013. Vol. 7, No. 3. P. 48–58. DOI: 10.1109/MIE.2013.2252957.
3. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. Cambridge: MIT Press, 2005. 647 p.
4. LaValle S. M. Planning Algorithms. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 842 p. URL: <http://planning.cs.uiuc.edu/>
5. HC-SR04 Ultrasonic Ranging Module. Technical Datasheet. Elecfreaks. 2013. URL: <https://www.elecfreaks.com> (date of access: 01.03.2025).
6. STMicroelectronics. VL53L1X World Smallest ToF Ranging Sensor with Long Ranging Distance. Datasheet DS12DSH. 2017. 31 p.
7. Slamtec Co., Ltd. RPLIDAR A1 Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner. User Manual and Datasheet. Ver. 1.0. 2019. URL: <https://www.slamtec.com> (date of access: 01.03.2025).
8. Лимар В. А. Дослідження безконтактних методів визначення відстані до об'єкта: магістерська робота / Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків, 2020. 94 с.
9. Arduino. Arduino UNO Rev3 Documentation. URL: <https://www.arduino.cc> (date of access: 01.03.2025).
10. Espressif Systems. ESP32-S3 Technical Reference Manual. Version 1.1. 2022. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_technical_reference_manual_en.pdf (date of access: 01.03.2025).
11. Everett H. R. Sensors for Mobile Robots: Theory and Application. Wellesley: A.K. Peters, 1995. 528 p.
12. Borenstein J., Everett H. R., Feng L. Navigating Mobile Robots: Sensors and Techniques. Wellesley: A.K. Peters, 1996. 350 p.

13. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82, No. 1. P. 35–45. DOI: 10.1115/1.3662552.
14. Barkovska O., Shapiro A., Mavrynskyi O., Zhebin P. Research on the Sensitivity of the Distance Measurement Method Based on the FaceMesh Algorithm. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2025. No. 2. P. 76–82. DOI: 10.26906/SUNZ.2025.2.76-82.
15. Besl P. J., McKay N. D. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1992. Vol. 14, No. 2. P. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791.
16. Monostori L. et al. Cyber-Physical Systems in Manufacturing. *CIRP Annals*. 2016. Vol. 65, No. 2. P. 621–641. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.005.
17. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. London: Springer, 2009. 632 p.
18. Toshiba Semiconductor. TB6612FNG Dual DC Motor Driver IC. Application Note Rev. 2.0. 2015. URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/TB6612FNG.pdf> (date of access: 01.03.2025).
19. ON Semiconductor. BC547 NPN General-Purpose Amplifier Transistor. Datasheet. 2005. URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BC547-D.PDF> (date of access: 01.03.2025).
20. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002. 824 p.
21. Espressif Systems. ESP32-S3-DevKitC-1 User Guide. 2022. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32s3/hw-reference/esp32s3/user-guide-devkitc-1.html> (date of access: 01.03.2025).
22. Cameron N. *Electronics Projects with the ESP32: Building Web Pages, Applications, and WiFi Enabled Devices*. — Apress, 2020. — 601 p.
23. Monk S. *Programming Arduino: Next Steps: Going Further with Sketches*. 2nd Edition. — McGraw-Hill Education, 2018. — 304 p.

24. Smith A. G. Sensors and Actuators: Control System Instrumentation. — CRC Press, 2021. — 488 p.
25. Li Y., Jain R. Advanced Robotics: Programming Microcontrollers for Reactive Systems. — Springer Nature, 2022. — 315 p.
26. ElectronicWings. Ultrasonic Module HC-SR04. URL: <https://www.electronicwings.com/sensors-modules/ultrasonic-module-hc-sr04> (date of access: 19.04.2026)
27. Taylor J. R. An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements. 2nd ed. — University Science Books, 1997. — 327 p.
28. Richardson L., Ruby S. RESTful Web Services: Designing API-Driven Applications. — O'Reilly Media, 2007. — 448 p.
29. Oppenheim A. V., Schafer R. W. Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed. — Prentice Hall, 2009. — 1108 p.
30. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. — 192 с.
31. Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2022. — 55 с.
32. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — 115 с.
33. Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — 419 с.

34. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
35. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
36. Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.
37. Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Галаган Р.М., Муравйов О.В., Момот А.С. Бездротові технології в автоматизації неруйнівного контролю. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71), № 5. с. 25-29.