

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 2025 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: «Автономний мобільний робот для транспортування вантажів»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК-11

Котусенко Артем Віталійович

Керівник:

д-р.філос., ст.в.

Момот Андрій Сергійович

Рецензент:

доцент каф. ІВТ, к.т.н., доцент

Синиця Валентин Іванович

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

Студент _____

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ	Пояснювальна записка	90	
3	A1	ПК-11.10.1760.00.000.Е2	Схема електрична функціональна	1	
4	A1	ПК-11.10.1760.00.000.Е3	Схема електрична принципова	1	
5	A1	ПК-11.10.1760.00.000.СК	Збірка загальна. Складальне креслення	1	
6	A1	ПК-11.10.1760.00.001.СК	Маніпулятор. Складальне креслення	1	
7	A1		Плакат	1	

				<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>		
	ПІБ	Підп.	Дата	<i>Автономний мобільний робот для транспортування вантажів</i>	Лист	Листів
Розробн.	Котусенко А.В.				1	1
Керівн.	Момот А.С.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПК-11	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.						

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автономний мобільний робот для
транспортування вантажів»**

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Котусенко Артему Віталійовичу

1. Тема проєкту «Автономний мобільний робот для транспортування вантажів», керівник проєкту Момот А.С., затверджені наказом по університету від «_28_»__05__ 2025 р. №_2121__
2. Термін подання студентом проєкту 04.06.2025 _____
3. Вихідні дані до проєкту : вантаж 15 кг (15×15×15 см), датчик лінії, маніпулятор «клешня».
4. Зміст пояснювальної записки: вступ, огляд сучасних рішень і аналіз предметної області, обґрунтування вибору технічних засобів, розробка конструкції мобільного робота, опис алгоритмів керування, реалізація програмного забезпечення, моделювання та тестування, висновки, список джерел, додатки.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): _____
6. Дата видачі завдання 14.04.25 _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	20.04.2025	виконано
2	Проведення аналітичного огляду	30.04.2025	виконано
3	Систематизація теоретичного матеріалу	05.05.2025	виконано
4	Розробка структурної схеми	15.05.2025	виконано
5	Підбір компонентів	20.05.2025	виконано
6	Розробка креслеників	27.05.2025	виконано
7	Формування загальних висновків	30.05.2025	виконано
8	Остаточне оформлення дипломного проєкту	02.06.2025	виконано

Студент

Артем КОТУСЕНКО

Керівник

Андрій МОМОТ

Анотація

У роботі розглянуто процес проектування та реалізації автономного мобільного робота, призначеного для транспортування невеликих вантажів у замкненому середовищі. Основна увага приділена створенню платформи, здатної автономно пересуватись за контрастною лінією, виявляти фінішну точку маршруту та виконувати захоплення й переміщення об'єкта за допомогою сервокерованого маніпулятора типу «клешня».

Система побудована на базі мікроконтролера STM32F103C8T6, що здійснює обробку даних з інфрачервоного сенсора лінії та ультразвукового датчика, керує чотирма приводними двигунами через драйвер L298N, а також формує широтно-імпульсні сигнали для чотирьох сервомоторів, які реалізують захоплення, поворот і підняття вантажу.

У ході розробки виконано обґрунтований підбір компонентів системи, побудовано структурну та функціональну схеми, здійснено розрахунки стійкості та навантаження на платформу, а також розроблено програмне забезпечення з логікою слідування за лінією, обробкою сигналів сенсорів та алгоритмом маніпулювання об'єктами. Запропоновано можливості подальшого розвитку системи, зокрема перехід на Raspberry Pi з інтеграцією елементів комп'ютерного зору та штучного інтелекту.

Отримані результати демонструють практичну реалізованість і ефективність запропонованого підходу до побудови недорогих мобільних платформ з елементами автономного керування для навчальних, дослідницьких або логістичних цілей.

Abstract

This work presents the design and implementation of an autonomous mobile robot intended for transporting small loads in a controlled indoor environment. The focus is placed on developing a platform capable of following a high-contrast line, detecting the endpoint of a predefined route, and autonomously performing object manipulation using a servo-driven gripper mechanism.

The system is based on the STM32F103C8T6 microcontroller, which processes signals from an infrared line-tracking sensor and an ultrasonic distance sensor. It controls four DC drive motors via an L298N driver and generates PWM signals to control four SG90 servo motors responsible for gripper rotation, opening/closing, and arm lifting operations.

Throughout the project, a well-justified selection of hardware components was performed. A complete structural and functional scheme was developed, mechanical and stability calculations for the chassis were provided, and custom firmware was created to implement line-following behavior, sensor signal processing, and object handling logic. Possible development paths are proposed, including migration to a Raspberry Pi platform with integration of computer vision and artificial intelligence modules.

The results demonstrate the practical feasibility and efficiency of the proposed approach for building cost-effective mobile robotic platforms with elements of autonomous navigation and manipulation, making it suitable for educational, experimental, or logistics-oriented applications.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ МОБІЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІКИ.....	12
1.1. Сучасний стан розвитку мобільних роботів	12
1.2. Аналіз автономних систем навігації роботів.....	16
1.2.1. Навігація за допомогою GPS.....	16
1.2.2. Навігація за маркерами (QR-коди, AprilTag).....	17
1.2.3. Слідування за лініями	18
1.2.4. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)	18
1.2.5. Навігація за поведінковими моделями	20
1.2.6. Алгоритми з використанням нейронних мереж	20
1.2.7. Мультисенсорна навігація	21
1.3. Класифікація типів автономних мобільних роботів	22
1.3.1. Класифікація за способом пересування	22
1.3.2. Класифікація за середовищем експлуатації.....	23
1.3.3. Класифікація за типом завдань	24
1.4. Аналіз існуючих рішень на ринку автономних мобільних роботів	26
1.4.1. Amazon Robotics (Kiva Systems).....	27
1.4.2. MiR (Mobile Industrial Robots).....	28
1.4.3. Clearpath Robotics (Otto Motors).....	28
1.4.4. Boston Dynamics (Stretch).....	29
1.5. Визначення основних функцій та принципу роботи робота.....	30
Висновки до розділу 1	32
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА, ЩО СЛІДУЄ ЗА ЛІНІЄЮ	33
2.1. Розробка функціональної схеми робота.....	33
2.2.1 Керуюча підсистема.....	35
2.2.2 Сенсорна підсистема.....	37
2.2.3 Приводна система	39
2.2.4 Підсистема енергоживлення	43
2.2.5 Підсистема захоплення об'єктів	45
2.2.6 Підсистема виявлення перешкод.....	49

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Котусенко А.В.			Автономний мобільний робот для транспортування вантажів	Лім.	Арк.
Перевір.		Момот А.С.					2
							32
Н. Контр.						<i>ПБФ, ПК-11</i>	
Затверд.		Момот А.С.					

Висновки до розділу 2	52
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА	53
3.1. Загальний опис конструкції мобільного робота.....	53
3.3. Розробка 3D-моделі конструкції робота	58
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ	64
4.1. Загальна структура програмного забезпечення.....	64
4.2. Алгоритм обробки сигналів датчиків лінії	67
4.3. Розробка алгоритму слідування за лінією (реалізація у коді)	68
4.4. Реалізація PID-регулятора для корекції траєкторії руху	70
4.5. Алгоритми керування двигунами постійного струму	72
4.6. Алгоритми керування маніпулятором для захоплення об'єктів	75
4.7. Можливості подальшого розвитку	77
Висновки до розділу 4.....	80
ВИСНОВКИ.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автономний мобільний робот для транспортування вантажів		
Розроб.		Котусенко А.В.					
Перевір.		Момот А.С.					
Н. Контр.							
Затверд.		Момот А.С.					
					Лім.	Арк.	Акрушів
						2	32
					<i>ПБФ, ПК-11</i>		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

1. AMP – автономний мобільний робот
2. ІЧ – інфрачервоний
3. PWM – широтно-імпульсна модуляція (англ. Pulse Width Modulation)
4. UART – універсальний асинхронний приймально-передавальний інтерфейс
5. GPIO – загальний вхід/вихід (англ. General Purpose Input/Output)
6. SLAM – одночасна локалізація і побудова карти (англ. Simultaneous Localization and Mapping)
7. PID – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
8. FDM – моделювання методом наплавлення (англ. Fused Deposition Modeling)
9. STM – мікроконтролер компанії STMicroelectronics
10. IDE – інтегроване середовище розробки (англ. Integrated Development Environment)
11. ADC – аналого-цифровий перетворювач (англ. Analog-to-Digital Converter)
12. IR – інфрачервоний (англ. Infrared)
13. CPU – центральний процесор (англ. Central Processing Unit)
14. GUI – графічний інтерфейс користувача (англ. Graphical User Interface)
15. DMA – прямий доступ до пам'яті (англ. Direct Memory Access)

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Розвиток сучасної робототехніки та мікропроцесорної техніки відкриває нові можливості для автоматизації процесів у різних сферах людської діяльності. В умовах стрімкого зростання логістичних, виробничих і сервісних потреб особливої уваги набувають мобільні автономні системи, здатні самостійно пересуватись у просторі, орієнтуватися в оточенні та виконувати завдання без постійного втручання людини.

Одним із перспективних напрямів є розробка вантажних мобільних роботів — технічних засобів, що здатні не лише пересуватись, а й взаємодіяти з фізичними об'єктами: захоплювати, переміщувати або сортувати їх. Такі системи вже активно застосовуються у складській логістиці, внутрішньому транспортуванні, доставці на «останній милі» та в автоматизованих виробництвах. Їхнє використання дозволяє суттєво підвищити ефективність логістичних процесів, знизити витрати на персонал та мінімізувати ризики помилок.

Для навчальних і прототипових цілей особливо актуальними є компактні автономні платформи, які поєднують базову навігацію, сенсорну взаємодію та просту маніпуляцію з об'єктами. Вони не лише наочно демонструють принципи автономної поведінки, але й дають змогу вивчати практичні аспекти електроніки, програмування та механіки.

У межах цієї дипломної роботи реалізовано проєкт автономного мобільного робота, здатного пересуватись по заздалегідь визначеній траєкторії з використанням сенсорів для слідування по лінії, виконувати захоплення об'єкта в кінцевій точці маршруту та повертатись у початкове положення. Конструкція робота включає сенсорну систему, виконавчі механізми для переміщення та маніпулятор для взаємодії з вантажем.

Результатом роботи є універсальна демонстраційна платформа, що поєднує в собі класичні алгоритми навігації та елементи роботизованої дії.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ МОБІЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІКИ

1.1. Сучасний стан розвитку мобільних роботів

Мобільна робототехніка є однією з найбільш динамічно зростаючих галузей сучасної інженерії. Вона об'єднує досягнення в області мехатроніки, автоматизації, штучного інтелекту, сенсорних систем і телекомунікацій. Її основне завдання — створення роботизованих платформ, здатних переміщуватися у просторі, орієнтуватися у середовищі та виконувати складні завдання без безпосередньої участі людини [1]. Приклад автоматизованого вантажного робота показано на рис. 1.1.



а)



б)

Рис. 1.1. Автономні вантажні роботи: а) – робот-маніпулятор;
б) – роботизована платформа

Поява високопродуктивних мікроконтролерів, доступних сенсорів і відкритих апаратно-програмних платформ зробила мобільну робототехніку доступною не лише для великих промислових підприємств, а й для освітніх, наукових і побутових потреб. Застосування мобільних роботів уже сьогодні охоплює сфери логістики, сільського господарства, медицини, охорони, розвідки, побуту та освіти. Їх ефективність доведена не лише в комерційних або

військових умовах, а й у сфері освіти, де такі системи використовуються для навчання майбутніх фахівців з інженерії, програмування та автоматики .

У розвинених країнах автономні мобільні роботи стали невід'ємним елементом концепцій "розумних міст", "розумної фабрики", цифрової логістики та індустрії 4.0. Їх здатність інтегруватися у великі ІТ-системи, передавати дані в хмару, підтримувати бездротовий зв'язок, приймати автономні рішення на основі даних від сенсорів — робить їх надзвичайно гнучким інструментом у сучасному технологічному середовищі.

Логістика та складські операції є одними з основних галузей, де мобільні роботи демонструють найбільший ефект [2]. Роботи здатні транспортувати вантажі, автоматизовано здійснювати сортування, комплектацію та доставку товарів до робочих станцій. Завдяки цьому підвищується ефективність зберігання, зменшується час обробки замовлень та мінімізуються людські помилки. Прикладом є роботи Amazon Robotics (Kiva), які здатні автономно пересувати цілі полиці з товарами. Компанії з Китаю, Південної Кореї та Європи також активно впроваджують AMR-платформи на своїх логістичних складах, зменшуючи залежність від людського ресурсу.

У промисловості мобільні платформи використовуються для транспортування комплектуючих між робочими зонами, доставки інструменту або заготовок, а також для інспекції обладнання [3]. Вони часто інтегруються в концепцію Industry 4.0, взаємодіють з іншими елементами розумного виробництва та обмінюються даними в реальному часі. У великих підприємствах такі роботи відіграють роль цифрових агентів — збирають дані, відправляють повідомлення про несправності, сканують зони виробництва тощо.

У медичних закладах мобільні роботи застосовуються для доставки медикаментів, стерильних інструментів або біоматеріалів між відділеннями. Наприклад, платформи TUG автоматизують внутрішньолікарняну логістику. Це зменшує навантаження на персонал та підвищує гігієнічну безпеку. У часи пандемії COVID-19 було доведено ефективність таких систем у зменшенні

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

міжособистісних контактів, що стало критичним для збереження життя пацієнтів і медичних працівників.

Сільське господарство також активно впроваджує мобільні системи — для моніторингу рослин, точного внесення добрив, виявлення шкідників, механізованого збирання врожаю. Відомі приклади — роботи Naïo Technologies, які можуть обробляти поля автономно. Роботи, оснащені GPS, комп'ютерним зором і маніпуляторами, здатні працювати на великих площах цілодобово, зменшуючи потребу у важкій сільськогосподарській техніці.

У військовій та рятувальній сфері мобільні роботи працюють у складних умовах, де присутність людини небажана. Їх використовують для розвідки, знешкодження вибухових пристроїв, транспортування боєприпасів або евакуації поранених. Наприклад, роботи Spot (Boston Dynamics) або платформи Ghost Robotics здатні виконувати завдання в автономному або телережимі. Такі роботи підвищують виживаність особового складу в зоні бойових дій та забезпечують гнучкість під час рішень у зоні ризику. Приклад роботів показано на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Автономні військові роботи: а) – роботизованою системою на борту Кемп-Фелтон; б) – BigDog

Побутові мобільні роботи (наприклад, Roomba) стали масовим продуктом, що виконує прибирання, догляд за газоном чи охорону. Вони прості у використанні, доступні за ціною та слугують прикладом популяризації

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

робототехніки серед населення. Більше того, вони стали важливою частиною досвіду взаємодії людини з автономними машинами, створюючи фундамент для прийняття роботизованих асистентів у повсякденному житті. Приклад робота показано на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Автономні військові роботи

У перспективі очікується подальше зростання ролі мобільної робототехніки — зокрема в міській логістиці (доставка останньої милі), у будівництві, у сфері обслуговування та інфраструктурного моніторингу.

Таким чином, мобільна робототехніка на сучасному етапі — це вже не технологія майбутнього, а актуальний інструмент підвищення ефективності, гнучкості та безпеки у різних сферах діяльності людини.Всі сфери показано на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Сфери в яких використовуються автономні роботи

1.2. Аналіз автономних систем навігації роботів

Автономна навігація — ключова функція мобільних роботів, яка визначає їхню здатність самостійно орієнтуватися у просторі, планувати маршрут, уникати перешкод та досягати заданих цілей без постійного втручання оператора [4]. Вибір системи навігації залежить від задачі, умов експлуатації, точності, необхідної автономності та ресурсоемності платформи.

1.2.1. Навігація за допомогою GPS

Глобальна система позиціонування (GPS) — найпоширеніший спосіб навігації у відкритих зовнішніх просторах. Робот отримує географічні координати від супутників і використовує їх для орієнтації на місцевості. За допомогою додаткових систем (наприклад, диференціального GPS) можна досягти точності до 10 см. Однак точність стандартного GPS у міських умовах часто знижується до кількох метрів через перешкоди сигналу (високі будівлі, дерева, метеоумови). Приклад показано на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Системи що використовують GPS

GPS-навігація має низку важливих переваг: глобальну доступність, простоту використання та придатність для орієнтації на великих відстанях, що робить її особливо ефективною у відкритих просторах і транспортних системах. Однак її точність суттєво знижується у складних міських умовах (так званих

					ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

"міських каньйонах") через відбиття сигналу від будівель, а в закритих приміщеннях система взагалі не працює, що значно обмежує сферу застосування мобільних роботів, орієнтованих виключно на GPS.

1.2.2. Навігація за маркерами (QR-коди, AprilTag)

У внутрішніх приміщеннях та контрольованих зонах часто використовують візуальні маркери — QR-коди або AprilTag, які прикріплюються до стелі, підлоги або стін. Камера робота зчитує ці маркери, визначаючи свою позицію або маршрут.

AprilTag — це відкритий, стійкий до шуму маркер, який легко розпізнається комп'ютерним зором. Він забезпечує однозначну ідентифікацію, орієнтацію в просторі та масштаб. Приклад показано на рис. 1.6.



Рис. 1.6. QR-коди

Навігація за маркерами, такими як QR-коди або AprilTag, забезпечує високу точність позиціонування без необхідності використання складних сенсорів чи обчислювально важких алгоритмів. Водночас її ефективність обмежується масштабом середовища: для роботи системи необхідне попереднє встановлення інфраструктури з маркерів, що ускладнює застосування в динамічно змінних або великих просторах.

1.2.3. Слідування за лініями

Цей метод широко використовується в освітніх, сервісних та промислових платформах. Робот використовує інфрачервоні або оптичні датчики для виявлення контрастної лінії на підлозі. За допомогою ПД-регулятора він зберігає траєкторію [5]. Приклад показано на рис. 1.7.

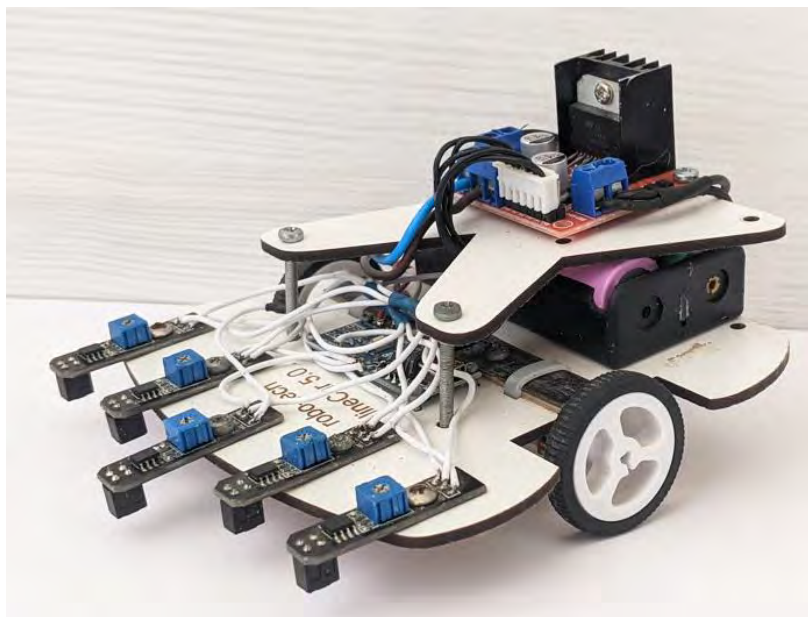


Рис. 1.7. Робот з датчиками ліній

Метод слідування за лініями вирізняється дешевизною, простотою реалізації та високою стабільністю за умови постійного, контрольованого середовища. Проте він має і суттєві обмеження: повна залежність від наявності лінійного маркування на поверхні унеможливорює роботу в динамічних або незнайомих умовах, а також позбавляє систему гнучкості й здатності адаптуватись до змін навколишнього середовища.

1.2.4. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

SLAM — одночасна локалізація та побудова карти — це складний алгоритм, який дозволяє роботу самостійно створювати карту середовища та визначати власне місцезнаходження в ній. Застосовуються лазерні далекоміри

(LiDAR), стереокамери, IMU та інші сенсори. SLAM може бути реалізований у двох основних формах [6]:

- Visual SLAM (на основі камер);
- LiDAR SLAM (на основі лазерного сканування).

Системи, що використовують SLAM, здатні функціонувати в невідомому середовищі без потреби в зовнішніх маяках чи GPS. Приклад показано на рис. 1.8.

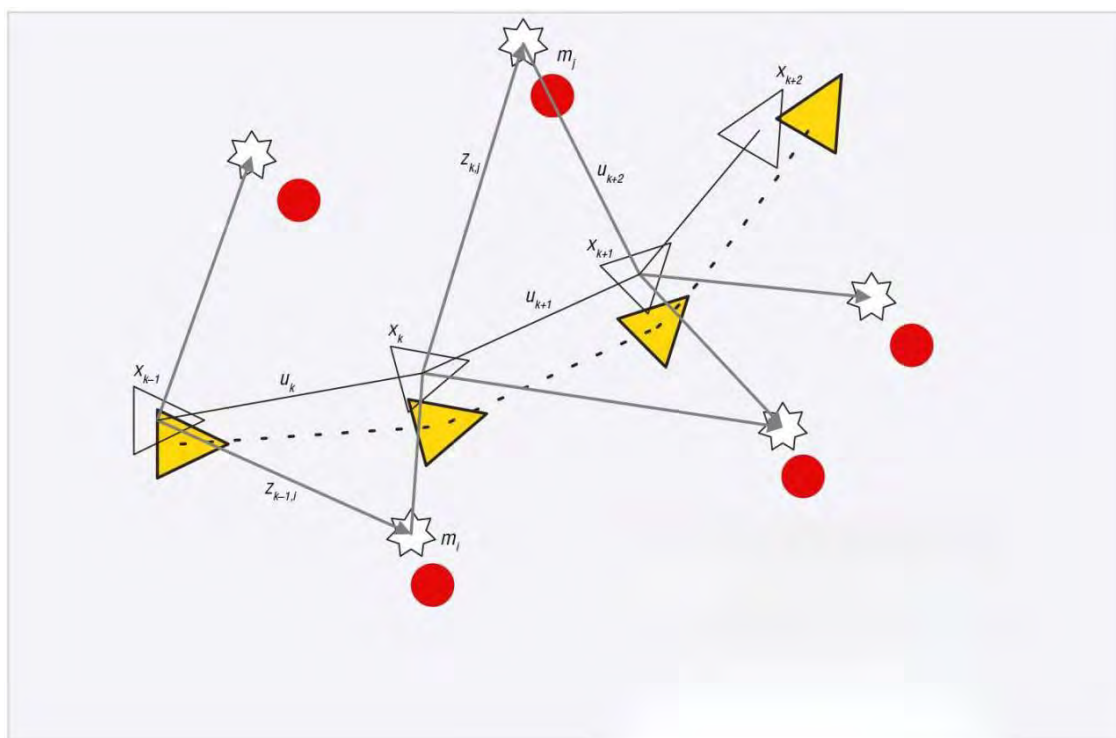


Рис. 1.8. SLAM алгоритм

Технологія SLAM має низку значних переваг, серед яких — автономність, здатність адаптуватись до змін середовища та можливість роботи у раніше невідомому просторі без зовнішніх маяків. Завдяки цьому роботи можуть будувати карту навколишнього середовища в реальному часі та одночасно визначати власне положення. Водночас метод SLAM є досить складним у реалізації, потребує високої обчислювальної потужності та має підвищене енергоспоживання, що обмежує його використання в малопотужних мобільних системах.

1.2.5. Навігація за поведінковими моделями

Цей підхід базується на наборі евристик та правил: “якщо побачив перешкоду — обійди праворуч”, “якщо наближаєшся до зони А — зменш швидкість”. Поведінкова модель зазвичай реалізується у формі дерева рішень або нейронної мережі з попереднім навчанням. Приклад показано на рис. 1.9.

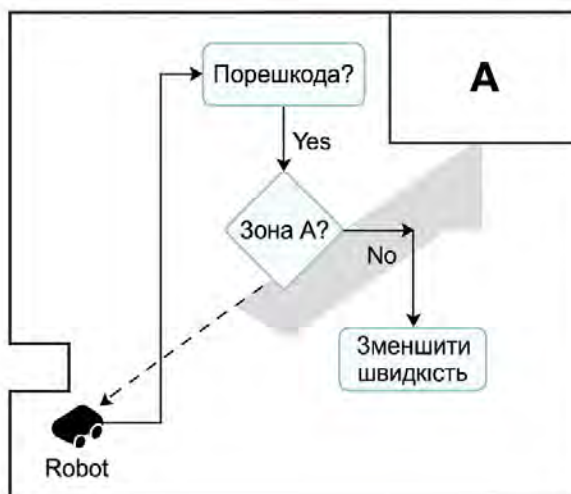


Рис. 1.9. SLAM алгоритм

Навігація на основі поведінкових моделей вирізняється швидкою реакцією на зміни в оточенні та відносною простотою реалізації у заздалегідь відомому середовищі. Такий підхід добре підходить для виконання локальних задач за принципом «якщо–то» (наприклад: якщо виявлено перешкоду — обійди її). Проте він має обмеження: відсутність глобального планування маршруту та слабка адаптивність у складних або непередбачуваних умовах зменшують його ефективність у відкритих або динамічних просторах.

1.2.6. Алгоритми з використанням нейронних мереж

Сучасні автономні роботи використовують згорткові нейронні мережі для: розпізнавання об'єктів на шляху; семантичної сегментації простору; планування маневрування; оцінки траєкторій у динамічному середовищі [7].

Ці підходи активно застосовуються в автономному транспорті, наукових дослідженнях та військових системах. Наприклад, Deep Reinforcement Learning дозволяє роботу навчатися шляхом проб і помилок. Приклад показано на рис. 1.10.



Рис. 1.10. Робот з AI

Алгоритми, що базуються на нейронних мережах і глибокому навчанні, забезпечують високу адаптивність, здатність до самонавчання та ефективну роботу в складних і непередбачуваних ситуаціях. Завдяки цьому роботи можуть розпізнавати об'єкти, прогнозувати дії, адаптувати поведінку до нових умов без жорстко заданих правил. Однак впровадження таких систем потребує значних обчислювальних ресурсів, великого обсягу навчальних даних та спеціалізованого програмного забезпечення, що ускладнює їх використання на малопотужних або недорогих платформах.

1.2.7. Мультисенсорна навігація

Найбільш надійні платформи поєднують кілька джерел даних: GPS + IMU + LiDAR + камера. Це дозволяє компенсувати слабкі сторони окремих сенсорів та забезпечити надмірність (redundancy), яка підвищує точність та надійність.

Такий підхід використовується у логістичних та промислових роботах, що працюють у напівструктурованих середовищах. Дані об'єднуються фільтрами Калмана або алгоритмами байєсівської оптимізації.

Сучасна практика показує, що найефективніші рішення — це ті, які інтегрують кілька методів одночасно, забезпечуючи гнучкість, масштабованість і відмовостійкість системи навігації.

1.3. Класифікація типів автономних мобільних роботів

Автономні мобільні роботи (AMR) — це різноманітна категорія роботизованих систем, які здатні переміщуватись в просторі без постійного втручання людини. Їх конструкція, принцип дії та сфера застосування можуть суттєво відрізнятись залежно від призначення, середовища роботи, технічних обмежень і рівня автономності. Щоб забезпечити ефективне планування, розробку та експлуатацію роботизованих платформ, застосовується класифікація, яка враховує ключові характеристики мобільних систем.

1.3.1. Класифікація за способом пересування

Однією з ключових характеристик будь-якого автономного мобільного робота є тип його пересування. Конструкція шасі безпосередньо впливає на прохідність, швидкість, енергоефективність та складність управління. Вибір способу пересування залежить від поставлених задач, рельєфу робочої зони, габаритів вантажу та інших експлуатаційних умов. Розглянемо основні типи мобільних платформ за способом пересування та їхні особливості.

Колісні роботи є найпоширенішим типом мобільних платформ. Вони відзначаються простою кінематикою, високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) і добрими показниками керованості на рівних поверхнях [8]. Такі роботи можуть бути обладнані диференціальним приводом, незалежним приводом на кожне колесо або омні-колесами, що забезпечують всенаправлений рух. Серед

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

прикладів можна згадати логістичні платформи Amazon Robotics та освітні моделі на кшталт Arduino Car або Line Follower.

Гусеничні роботи застосовуються переважно для переміщення по нерівних або сипучих поверхнях. Завдяки великій площі контакту з ґрунтом вони забезпечують кращу прохідність у складних умовах [9]. Водночас їхня маневровість є меншою, а елементи шасі швидше зношуються. Такі платформи використовуються у військовій техніці, рятувальних операціях та аграрному секторі. Відомими прикладами є робот TALON та гусеничні шасі від компанії Dagü.

Крокуючі (ногасті) роботи вирізняються складною механічною будовою та вимогливою системою балансування. Вони ефективні у важкодоступних середовищах або на складному рельєфі, де потрібно адаптуватися до сходів, щілин чи значних нерівностей. Типовими прикладами таких систем є Spot від Boston Dynamics, робот ANYmal та різні варіанти Hexapod.

Гібридні системи поєднують кілька способів пересування, наприклад, колісно-крокуючі або колісно-плавальні платформи [10]. Їхнє застосування характерне для військових та дослідницьких проєктів, де необхідна універсальність і можливість адаптації до різноманітних умов експлуатації.

1.3.2. Класифікація за середовищем експлуатації

Середовище, в якому функціонує мобільний робот, суттєво впливає на його конструкцію, вибір сенсорного оснащення, тип навігаційної системи та рівень захисту від зовнішніх впливів. Відповідно до умов експлуатації — від замкнених приміщень до відкритих майданчиків або змішаних зон — застосовуються різні технічні рішення. Класифікація автономних мобільних роботів за середовищем експлуатації дозволяє краще зрозуміти їхню специфіку та вимоги.

До внутрішніх (індоре) належать роботи, що працюють у приміщеннях, таких як склади, лікарні, офіси. Вони потребують високої точності переміщення, безпечної взаємодії з людьми та здатності орієнтуватися у вузьких або

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

обмежених просторах [11]. Для навігації часто застосовуються маркери, слідування за лініями або алгоритми одночасної локалізації та побудови карти (SLAM). Прикладами таких роботів є MiR (Mobile Industrial Robots), сервісний робот PuduBot, а також внутрішні кур'єрські платформи для офісів.

Зовнішні (аутдоре) роботи призначені для експлуатації на відкритому повітрі та в умовах змінного клімату. Вони повинні бути стійкими до дощу, пилу, перепадів температур і здатними орієнтуватися у просторі без структурованих орієнтирів. Для цього використовуються системи глобального позиціонування (GPS), лазерні далекоміри (LiDAR) та комп'ютерний зір. Типовими представниками є автономні автомобілі, агроботи від Naïo Technologies та дослідницькі платформи, що використовуються для мапування і моніторингу територій.

Роботи змішаного середовища поєднують переваги обох попередніх класів. Вони оснащуються гібридною системою навігації, мають герметичні корпуси з пиловологозахистом і програмне забезпечення, яке адаптується до змін середовища [12]. Такі платформи здатні працювати як у приміщеннях, так і на вулиці, зберігаючи стабільність функціонування та точність позиціонування в обох випадках.

1.3.3. Класифікація за типом завдань

Сервісні роботи використовуються для виконання допоміжних завдань у сфері обслуговування [13]. До їх функцій належить доставка їжі, медикаментів, документації, а також супровід або навігація відвідувачів у лікарнях, готелях, офісних центрах та інших громадських установах. Такі роботи мають привабливий зовнішній вигляд, інтерактивний інтерфейс і можуть функціонувати у безперервному режимі, замінюючи персонал у стандартних задачах. Показано на рис. 1.11.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

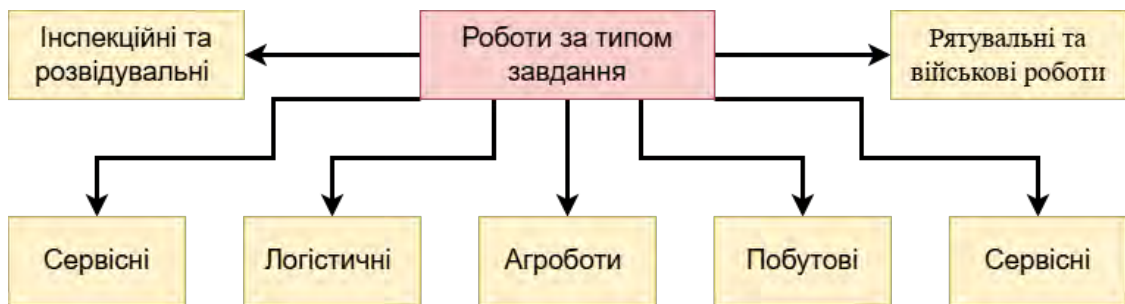


Рис. 1.11. Роботи за типом завдання

Логістичні роботи призначені для транспортування вантажів у межах складів, виробничих приміщень, дистрибуційних центрів. Вони здатні автономно переміщати палети, коробки або контейнери, взаємодіючи з інфраструктурою за допомогою датчиків, навігаційних систем і централізованого диспетчерського керування. Цей тип роботів значно знижує навантаження на працівників і підвищує ефективність логістичних процесів.

Інспекційні та розвідувальні роботи застосовуються для моніторингу й обстеження важкодоступних, небезпечних або технічно складних об'єктів [14]. Вони можуть використовуватись для обстеження трубопроводів, інфраструктурних споруд, шахт або територій із ризиком вибуху чи хімічного забруднення. Такі роботи часто оснащуються камерами, сенсорами, тепловізорами і працюють як автономно, так і під керуванням оператора.

Агроботи застосовуються у сільському господарстві для виконання різноманітних задач — від моніторингу стану рослин і внесення добрив до збирання врожаю і виявлення шкідників [15]. Вони здатні працювати на великих площах у режимі 24/7, використовуючи GPS-навігацію, комп'ютерний зір, аналіз ґрунту та погодних умов. Такі платформи зменшують потребу у важкій техніці та підвищують точність агрономічних операцій.

Рятувальні та військові роботи призначені для виконання завдань у небезпечних умовах, де присутність людини може бути фатальною [16]. Вони використовуються для розмінування територій, евакуації поранених, пошуку постраждалих, а також підтримки підрозділів у бойових діях. Здатні працювати

у режимах автономного та дистанційного керування, часто мають броньований корпус, гусеничне шасі та систему нічного бачення.

Побутові роботи — це роботи для домашнього використання, які виконують функції прибирання (пилососи, газонокосарки), охорони, або взаємодіють з людьми як персональні асистенти. Вони є найбільш доступними серед усіх типів роботів, часто мають інтелектуальні функції, розпізнавання голосу та підключення до систем «розумного дому». Їх популярність постійно зростає разом із розвитком штучного інтелекту та IoT-технологій.

Аналітичний підсумок

Класифікація мобільних роботів дозволяє краще розуміти їхню архітектуру, вимоги до апаратної бази та програмного забезпечення. Розробка системи управління роботом завжди має враховувати:

- тип шасі;
- середовище експлуатації;
- спосіб навігації;
- потребу в автономності;
- тип виконуваних задач.

У межах даного дипломного проєкту реалізується колісна платформа, призначена для внутрішнього середовища, з можливістю напівавтономної роботи, орієнтована на виконання задач транспортування вантажу по простому маршруту з використанням сенсорної системи.

1.4. Аналіз існуючих рішень на ринку автономних мобільних роботів

У контексті зростання потреб у внутрішній логістиці, автоматизованому транспортуванні та адаптивному управлінні ресурсами, на ринку з'являється все більше комерційних рішень у сфері автономних мобільних роботів (AMR) [17]. Провідні компанії розробляють високотехнологічні платформи, які поєднують автономну навігацію, гнучку архітектуру та можливість інтеграції з корпоративними цифровими системами — такими як WMS, ERP або MES.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Більшість сучасних AMR-рішень базуються на модульних шасі, оснащених сенсорними системами для орієнтації у просторі (SLAM, LiDAR, камери, ультразвук), здатних виконувати як стандартні логістичні операції (переміщення вантажів, буксирування візків), так і складні маніпуляції з об'єктами. Такі системи вже активно застосовуються на складах, у виробничих цехах, дистрибуційних центрах і логістичних хабах.

У цьому підпункті буде розглянуто приклади найуспішніших AMR-рішень від провідних світових виробників, що мають практичне значення для проєктування власної мобільної платформи в межах даного дипломного проєкту.

1.4.1. Amazon Robotics (Kiva Systems)

У сучасній логістиці та промисловості автономні мобільні роботи для транспортування вантажів (AMR – Autonomous Mobile Robots) стають критично важливим компонентом автоматизованих систем. Вони дозволяють значно знизити витрати на ручну працю, підвищити швидкість і точність доставки, а також адаптуватися до гнучких змін у виробничих процесах. Впровадження AMR є ключовим елементом переходу до концепції "розумного складу" або "індустрії 4.0".

У цьому підпункті розглянуто найбільш відомі й технічно досконалі реалізації таких систем від провідних світових компаній, які вплинули на формування ринку роботизованої логістики.

Після придбання компанії Kiva Systems у 2012 році, Amazon реалізувала масштабовану платформу автономних мобільних роботів на своїх складах. Роботи Kiva пересувають цілі стелажі з товарами до операторів, що дозволяє значно зменшити кількість проходів і пришвидшити комплектацію замовлень. Вони працюють на основі QR-кодів, нанесених на підлогу, використовують SLAM і централізовану систему керування флотом [18]. Інфраструктура Amazon дозволяє динамічно планувати маршрути, відстежувати стан кожного робота в

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

режимі реального часу та оптимізувати розташування товарів. Приклад показано на рис. 1.12.



Рис. 1.12. Робот Amazon Robotics

1.4.2. MiR (Mobile Industrial Robots)

Данська компанія MiR розробляє універсальні колісні платформи з високим рівнем автономності, які орієнтуються в просторі за допомогою лазерних сканерів і камер. Їхні роботи здатні транспортувати вантажі до 1000 кг, працюють як усередині підприємств, так і в логістичних хабах. Особливістю рішень MiR є наявність надбудов: модулів для перевезення ящиків, палет або навіть колаборативних маніпуляторів. Роботи інтегруються з автоматичними воротами, ліфтами та іншими системами інфраструктури. Приклади показано на рис. 1.13.



Рис.1.13 Робот MiR1000 та MiR500

1.4.3. Clearpath Robotics (Otto Motors)

Otto – це серія вантажних роботів від канадської компанії Clearpath Robotics, орієнтованих на важку промисловість. Вони можуть переміщувати

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

вантажі масою до 1500 кг, автономно будувати карти приміщень, обходити перешкоди та оптимізувати маршрути. Otto підтримує флот-менеджмент, що дозволяє об'єднувати десятки пристроїв у єдину систему [19]. Платформа надає API для розробки індивідуальних сценаріїв роботи. Приклад показано на рис. 1.14.



Рис. 1.14. Автономні роботи ОТТО

1.4.4. Boston Dynamics (Stretch)

Stretch — робот, спеціалізований на розвантаженні/навантаженні коробок з палет. Він оснащений візуальними сенсорами, лідаром, системою балансування та вакуумним маніпулятором, здатним захоплювати об'єкти вагою до 23 кг. Stretch вміє орієнтуватися в просторі без потреби в реконфігурації складу, розпізнавати розміри та орієнтацію коробок у реальному часі. Хоча він не є мобільною платформою в класичному розумінні, його можна розглядати як вузькоспеціалізований AMR для автоматизації останньої ланки логістичного ланцюга [20]. Приклад показано на рис. 1.15.



Рис. 1.15. Автономні вантажні роботи Boston Dynamics

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

1.5. Визначення основних функцій та принципу роботи роботи

Автоматизація внутрішньоцехового транспортування, логістики та навчального демонстрування дедалі більше потребує простих, надійних і адаптованих автономних рішень. Мобільні роботи, які здатні пересуватись без стороннього втручання, виконуючи завдання доставки вантажів у контрольованому середовищі, стають важливою складовою сучасної інженерії. Саме створенню такого рішення присвячено даний дипломний проєкт.

Мета системи — повністю автоматичне транспортування об'єкта заданими умовами. Робот самостійно рухається по поверхні, слідуючи за контрастною лінією, фіксує момент досягнення кінцевої точки маршруту, виконує захоплення вантажу, після чого повертається назад до стартової позиції. Весь цикл проходить без участі оператора і не потребує використання зовнішніх навігаційних технологій, таких як GPS або оптичні маяки. Реалізація функціоналу забезпечується комбінацією сенсорів, виконавчих елементів і програмної логіки, зосередженої в єдиній керуючій підсистемі.

Основу обчислювальної частини складає мікроконтролер. Він координує роботу всієї системи: аналізує сигнали з сенсорів, формує керуючі імпульси до моторів і сервоприводів, обробляє команди з пульта дистанційного керування. Програмна реалізація алгоритму дозволяє в реальному часі реагувати на зміни середовища, забезпечуючи точну навігацію, плавне маневрування та стабільне виконання дій захоплення.

Основна навігація реалізована за допомогою інфрачервоного датчика лінії. Сенсор має три цифрові канали: лівий, центральний та правий. За рахунок відмінності у відбитті інфрачервоного сигналу від світлих і темних поверхонь, система отримує інформацію про положення відносно маршруту. Відповідно до цього робот коригує швидкість обертання лівих і правих коліс, що дозволяє дотримуватись траєкторії. Втрата лінії всіма трьома каналами трактується як досягнення точки зупинки, що слугує сигналом до активації маніпулятора.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Захоплення вантажу здійснюється за допомогою маніпулятора типу «клешня», який реалізований на трьох серводвигунах. Ці приводи повинні забезпечувати високий крутний момент та мати вбудований магнітний зворотний зв'язок і керуватися за допомогою серійного інтерфейсу. Це дозволяє досягти високої точності керування, зокрема кутового положення, швидкості та сили стискання. Кожен привід виконує окрему функцію: один відповідає за горизонтальний поворот основи, другий — за вертикальне піднімання/опускання, третій — за стискання/розтискання клешні.

Для руху платформи використовується чотири двигуни постійного струму з редуктором. Двигуни завдяки високому крутному моменту повинні дозволяти транспортувати вантаж масою до 15 кг із габаритами 15×15×15 см. Керування моторами здійснюється за допомогою драйвера, який забезпечує високоефективне диференційне керування, включаючи розвороти на місці.

Живлення усього комплексу здійснюється від літійового акумулятора. Така конфігурація повинна працювати до 1 години без підзарядки в активному режимі з урахуванням споживання як логічної, так і силової частини. Живлення силових компонентів розділено із логічним, що мінімізує ймовірність помилок у роботі системи керування навіть при пікових навантаженнях.

Інтерфейс дистанційного керування реалізовано через інфрачервоний модуль, який дозволяє запускати роботу, зупиняти, а також ініціювати окремі дії, як-от тестові або аварійні. Обробка команд здійснюється мікроконтролером у режимі зовнішніх переривань, що забезпечує оперативність реакції.

Загальна схема зв'язків між модулями представлена на рисунку 1.15, де відображено структуру основних підсистем і логіку взаємодії. Такий підхід дозволяє масштабувати систему в майбутньому — наприклад, шляхом додавання нових сенсорів, розширення функціоналу або інтеграції з хмарними сервісами.

Надається за запитом

Рис. 1.15. Структурна схема автономного мобільного робота

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Реалізований робот є базовою, але функціонально завершеною платформою для транспортування вантажів, яку можна вдосконалювати, додаючи елементи штучного інтелекту, автономного планування маршруту або машинного зору.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було сформовано загальну концепцію створення автономного мобільного робота для транспортування вантажів у контрольованому середовищі. Проведено огляд сучасних тенденцій у галузі мобільної робототехніки, класифіковано типи робіт за призначенням, способом навігації та архітектурою керування. Визначено вимоги до функціональності системи, зокрема автономність, здатність до слідування за траєкторією, наявність маніпулятора для захоплення об'єктів, та здатність повертатись у початкову точку. У результаті було сформульовано чітке технічне завдання, що стало основою для подальшої розробки апаратної структури системи у наступному розділі.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА, ЩО СЛІДУЄ ЗА ЛІНІЄЮ

2.1. Розробка функціональної схеми робота

Функціональна схема є логічною моделлю автономного мобільного робота, яка дозволяє на концептуальному рівні відобразити зв'язки між підсистемами, напрямки передавання сигналів, розподіл енергоживлення та типи взаємодій між електронними компонентами. Вона не описує фізичне розташування модулів, однак чітко демонструє, як кожен блок пристрою взаємодіє з іншими, і яка роль відведена кожному з них у загальній архітектурі системи.

Центральним елементом проєктованої платформи є мікроконтролер, що забезпечує обробку вхідної інформації, виконання логіки керування, генерацію широтно-імпульсних сигналів для виконавчих елементів, а також зв'язок із пультом користувача. Саме він приймає сигнали з сенсорної підсистеми, обчислює траєкторію руху, ініціює захоплення вантажу та керує усіма компонентами виконавчої системи.

Інфрачервоний датчик лінії, підключений до цифрових входів мікроконтролера, здійснює детекцію чорної траєкторії на фоні світлої поверхні. Він складається з трьох незалежних каналів, які виводять логічний сигнал у разі фіксації лінії. Комбінація цих сигналів дозволяє точно визначати положення робота відносно маршруту та коригувати рух у реальному часі. У разі одночасної відсутності сигналів зі всіх каналів система розпізнає момент досягнення кінцевої точки маршруту.

Окрім навігації, важливу роль відіграє модуль контролю об'єкта — ультразвуковий датчик, який дозволяє фіксувати наявність вантажу в зоні дії маніпулятора. Він підключений до мікроконтролера через порти Trig і Echo, а вимірювання відстані базується на розрахунку часу між переданим імпульсом і прийнятим відбиттям. Це дає змогу перевірити, чи об'єкт на місці перед виконанням дії захоплення.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Для реалізації руху платформи використовується чотири двигуни з редукторами, які підключаються до драйверів. Цей драйвер підтримує високі струми і дозволяє точно регулювати як швидкість обертання, так і напрямок обертання двигунів. Швидкість задається за допомогою PWM-сигналів із таймера TIM2 мікроконтролера, а логічні рівні на GPIO-виходах визначають напрямок. Таким чином, забезпечується як поступальний рух, так і повороти та маневрування на місці.

Маніпулятор-клевня керується трьома сервомоторами із магнітним зворотним зв'язком і серійним протоколом зв'язку. Для підключення використано UART-сумісні порти мікроконтролера, через які передаються командні пакети із зазначенням кута повороту або зусилля. Таке рішення дозволяє не лише підвищити точність керування, але й вивільнити ресурси мікроконтролера, оскільки серво самостійно обробляє команди й утримує положення.

Модуль приймання команд користувача реалізований на базі інфрачервоного приймача. Він підключається до одного з вільних входів мікроконтролера, який налаштований на генерацію переривань при надходженні нового ІЧ-пакету. У результаті система може реагувати на команди запуску, зупинки або перемикання режимів миттєво, навіть під час виконання іншого коду.

Система живлення побудована на основі літієвого акумулятора, що забезпечує стабільну роботу роботи протягом тривалого часу. Напруга подається на драйвер і мотор-редуктори напряму, тоді як окремі гілки стабілізуються до 5 В (для сенсорів) та 3.3 В (для мікроконтролера). Такий розподіл мінімізує вплив пускових струмів на чутливу електроніку і забезпечує розділення логіки та силових навантажень.

Для кращого розуміння принципу дії системи на рисунку нижче наведено функціональну блок-схему, яка відображає зв'язки між модулями, сигнальні тракти, типи команд та напрямки керування.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Надається за запитом

Рис. 2.1. Функціональна схема автономного мобільного робот

Цей підхід до побудови функціональної структури забезпечує масштабованість і дозволяє з легкістю адаптувати систему до нових задач — зокрема, підключення нових сенсорів, використання інших типів сервоприводів, або впровадження інтелектуальних алгоритмів у майбутніх версіях.

2.2.1 Керуюча підсистема

Центральною ланкою всієї системи автономного мобільного робота є керуюча підсистема, яка забезпечує узгоджену взаємодію між сенсорами, приводами, виконавчими механізмами та інтерфейсами взаємодії з користувачем. Саме в ній зосереджено аналіз вхідної інформації, прийняття рішень згідно із закладеною логікою, формування команд та передача їх до виконавчих пристроїв. У цьому проєкті як основний контролер обрано STM32F103C8T6 — 32-бітний мікроконтролер на базі ядра ARM Cortex-M3, що поєднує високу обчислювальну продуктивність, енергоефективність та зручність програмної конфігурації [21].

Рішення про вибір саме цього мікроконтролера було прийнято після порівняння з низкою альтернатив, серед яких розглядалися ATmega328P, ESP32 та RP2040. Усі вони мають певні переваги, однак саме STM32 забезпечує оптимальний баланс між кількістю периферійних інтерфейсів, можливістю апаратної генерації PWM, високою частотою (72 МГц) та широкою підтримкою інструментів розробки. До того ж, цей контролер має достатній обсяг Flash-пам'яті (64 КБ) і оперативної пам'яті (20 КБ), що дозволяє реалізувати складну багатомодульну логіку керування без ризику нестачі ресурсів. Схема зображена на рис. 2.2.

Надається за запитом

Рис. 2.2. Логічна схема підключення компонентів до STM32F103C8T6

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

У запропонованій архітектурі STM32F103C8T6 здійснює зчитування сигналів з інфрачервоного сенсора KS0453 через цифрові входи PA6, PA7 та PB0. Дані з трьох каналів аналізуються у режимі опитування, після чого приймається рішення щодо зміни напрямку руху робота. Для виявлення об'єктів у зоні дії передбачено підключення ультразвукового датчика HC-SR04, сигнали якого зчитуються через PB10 (Trig) та PB11 (Echo). Визначення відстані здійснюється на основі часу затримки імпульсу, що обробляється через таймер з фіксацією фронтів сигналу.

Сигнали до драйвера Pololu G2 High-Power Motor Driver 18v17 формуються з портів STM32: логічні рівні передаються через PA2–PA5 для керування напрямком, а PWM-сигнали на порти PA0 та PA1 використовуються для регулювання швидкості обертання моторів. Це дозволяє точно задавати швидкість і виконувати розвороти завдяки різниці в обертах лівого та правого борту.

Особливістю цієї версії є використання високоточних серводвигунів HTD-30H, які керуються за допомогою послідовного інтерфейсу, а не звичайного PWM. У зв'язку з цим, для їх підключення використано UART-порти мікроконтролера, які не задіяні в інших частинах системи, наприклад, PA15, PB3 та PB4. Це дозволяє надсилати серійні команди напряму до кожного сервомотора без створення надмірного навантаження на CPU або конфліктів між таймерами. Кожен серво здатний надавати зворотний зв'язок, включаючи кутове положення, струм та температуру, що відкриває шлях до подальшого вдосконалення алгоритмів захоплення і стабілізації.

Взаємодія з пультом дистанційного керування організована через інфрачервоний модуль HX1838, підключений до PB12. Він конфігурований як вхід із зовнішнім перериванням (EXTI) і дозволяє миттєво обробляти команди користувача. Для налагодження та логування станів системи використовується UART-інтерфейс через PA9 (TX) і PA10 (RX), підключений до USB-UART перехідника.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Інтеграція всіх функцій в одному контролері забезпечує компактність, енергоефективність та можливість реалізувати автономну систему з високим ступенем адаптивності. Схема логічних з'єднань між мікроконтролером і виконавчими модулями зображена на рисунку нижче.

Завдяки широким можливостям STM32F103C8T6 ця система зберігає масштабованість: можливо легко додати нові сенсори, серводвигуни, розширити кількість керованих пристроїв або перенести логіку на більш потужний контролер без зміни базової архітектури.

2.2.2 Сенсорна підсистема

Сенсорна підсистема є однією з ключових функціональних складових автономного мобільного робота, оскільки вона забезпечує здатність пристрою орієнтуватися у просторі та коригувати рух відповідно до навколишніх умов. У межах цього проєкту головним завданням сенсорної підсистеми є визначення положення робота відносно заданої траєкторії, яка нанесена на поверхню у вигляді контрастної чорної лінії. Для розв'язання цієї задачі використовується трьохканальний цифровий інфрачервоний датчик Keyestudio KS0453, що дозволяє реалізувати алгоритм слідування з високою точністю при мінімальному апаратному навантаженні.

Принцип дії датчика базується на оптичному контрасті поверхонь. Кожен канал модуля включає інфрачервоний світлодіод, який випромінює світло вниз, та фототранзистор, що приймає відбиті промені. Якщо під сенсором знаходиться світла поверхня — відбите світло повертається до фототранзистора, і на виході формується логічна одиниця (HIGH). Якщо ж світло поглинається (чорна поверхня), фототранзистор не спрацьовує, і на виході з'являється логічний нуль (LOW). Комбінація сигналів з трьох каналів (лівого, центрального та правого) дозволяє мікроконтролеру STM32 визначити напрямок руху або виявити необхідність корекції.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі розробки системи розглядалося кілька альтернатив. Серед них — аналоговий модуль TCRT5000, що потребує АЦП та складної калібровки, а також сенсорна лінія Pololu QTR-8RC з 8 каналами, яка дозволяє точну навігацію, але є занадто складною і дорогою для даного застосування. У порівнянні з ними, KS0453 виявився найкращим вибором за критеріями ціна/якість, простота інтеграції, стабільність сигналу та енергоефективність.

Підключення до мікроконтролера STM32F103C8T6 реалізовано через три цифрові входи: PA6, PA7, PB0. Усі порти налаштовані у режимі GPIO Input з внутрішнім підтягуванням (Pull-up), що дозволяє чітко зчитувати логічні рівні. Зчитування виконується в основному циклі програми або з певною періодичністю, наприклад, кожні 10–20 мс.

Сенсор встановлюється у нижній передній частині робота. Найкращі результати показано при висоті 10–11 мм над поверхнею. При цьому досягається оптимальне співвідношення відбитого та поглиненого сигналу. Під час експериментів було встановлено, що при ширині лінії 18 мм і освітленні 500–700 лк датчик стабільно працює без хибних спрацьовувань.

Усі три канали формують цифровий вихід, який безпосередньо подається до контролера. У коді кожен стан (наприклад, 010, 001, 011) відповідає певній дії: рух вперед, поворот праворуч, поворот ліворуч, зупинка. Весь алгоритм керування приводом побудований на логіці цих комбінацій, що дозволяє забезпечити повністю автономне слідування без використання карт, камер або SLAM-алгоритмів. Схема зображена на рис. 2.3.

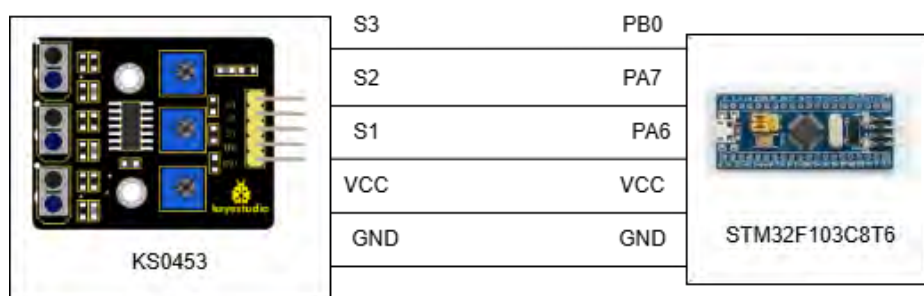


Рис. 2.3. Схема підключення ІЧ-датчика KS0453 до мікроконтролера STM32F103C8T6

Окрему увагу було приділено живленню сенсора. Оскільки він працює на напрузі 5 В, живлення подається через стабілізований вихід від L298N або окремий регулятор напруги. Для зменшення імпульсних завад від двигунів, у системі живлення передбачено фільтрацію через електролітичні конденсатори ємністю 470–1000 мкФ. Додатково у коді реалізовано програмну фільтрацію сплесків шляхом подвійного опитування сенсора та debounce-затримки у 5 мс.

Фізичний принцип дії сенсора базується на коефіцієнті відбивання RRR, що визначає інтенсивність сигналу, який повертається до фотоприймача:

$$I_r = I_0 * R \quad (2.1)$$

де I_0 — інтенсивність ІЧ-випромінювання. Для білого кольору $R \approx 0.85R$, а для чорного — лише $R \approx 0.05R$ $\approx 0.05R \approx 0.05$, що забезпечує відносну різницю у 17 разів і дозволяє чітко розрізняти кольори на рівні простого компаратора.

Переваги обраного рішення:

- мінімальна кількість пінів STM32;
- просте програмування;
- відсутність потреби в АЦП;
- стабільна робота за мінімального освітлення;
- відсутність необхідності в складному калібруванні.

Завдяки описаній реалізації сенсорна підсистема виконує роль основного засобу навігації і дозволяє роботу працювати автономно в межах заданої траєкторії, реалізуючи повний цикл транспортування вантажу без залучення складних зовнішніх систем позиціонування.

2.2.3 Приводна система

Приводна система автономного мобільного робота є ключовим виконавчим елементом, що забезпечує його переміщення в просторі. Вона реалізує

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

поступальний рух уперед і назад, повороти на заданий кут, розвороти на місці та забезпечує компенсацію зсувів або втрат рівноваги при транспортуванні вантажів [22]. Якість і стабільність роботи цієї підсистеми безпосередньо визначає точність слідування траєкторії, відповідність навігаційним алгоритмам і здатність робота до адаптації в динамічному середовищі.

В основі приводної системи лежить чотириелектродвигунна конфігурація, побудована на базі моторів постійного струму типу 5840-31ZY, кожен із яких має вбудований редуктор. Ці двигуни працюють при напрузі 12 В та розвивають швидкість обертання 27 об/хв, що забезпечує потрібний баланс між тяговими характеристиками та плавністю переміщення. Вихідний крутний момент після редукції перевищує 10 кг·см, що є достатнім для руху платформи загальною масою до 20 кг, включаючи її власну вагу, вантаж і сили опору тертю.

Обґрунтування вибору саме чотирьох моторів пов'язане з кількома критичними технічними та експлуатаційними аспектами. Застосування незалежного приводу на кожне колесо забезпечує точну реалізацію диференціального керування, завдяки якому робот здатен виконувати оберти навколо вертикальної осі, плавно заходити в повороти та компенсувати асиметричні сили під час руху з навантаженням. Така компоновка також дозволяє досягти більшої стійкості в русі, оскільки центр маси рівномірно розподіляється по чотирьох точках опори. Окрім того, розділення тягового зусилля між чотирма точками дозволяє зменшити пікові навантаження на кожен окремий мотор, що знижує ймовірність перегріву та подовжує термін служби приводу.

Для підтвердження вибору проведено розрахунок необхідної сили тяги. При загальній масі конструкції з вантажем приблизно 19 кг і коефіцієнті тертя колеса по твердій поверхні близько 0,2, загальна сила тяги становить $F=0.2 \cdot 19 \cdot 9.81 \approx 37.3$. Розділивши її на чотири колеса, отримаємо, що кожен двигун повинен забезпечити тягу близько 9.3 Н. При радіусі колеса 5 см необхідний крутний момент на одному колесі становить $M=F \cdot R=9.3 \cdot 0.05=0.465$ Н·м, або 4.65 кг·см. Таким чином, двигуни 5840-31ZY мають більш ніж двократний запас по

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

моменту, що гарантує надійність роботи навіть при неідеальних умовах (нерівності, нахили, прослизання тощо). Двигун показано на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Двигун 5840-31ZY

Варто порівняти обрані двигуни з деякими поширеними аналогами. Наприклад, двигуни типу 25GA370, популярні в освітніх і легких проєктах, мають номінальний момент до 3–4 кг·см після редукції, що є недостатнім для нашого робота з вантажем у 15 кг. При використанні таких двигунів без значного зниження швидкості або зменшення ваги вантажу платформа втрачає здатність до впевненого руху, особливо на ухилах. Інший приклад — двигуни типу N20 з мініатюрними редукторами, що зазвичай використовуються в роботах вагою до 1–2 кг, узагалі не розглядаються як кандидат через надто низький момент, малі колеса та обмежену довговічність.

У порівнянні з ними, двигуни 5840-31ZY забезпечують ідеальне поєднання параметрів: високий крутний момент, низька швидкість (завдяки редуктору), металевий корпус, довгий ресурс роботи та сумісність з існуючим живленням 12 В. Це дозволяє уникнути перевантажень у драйверах, надмірного зношення шестерень, а також забезпечує точне керування швидкістю руху платформи в режимі слідування по лінії.

Двигуни керуються через два драйвери Pololu G2 High-Power Motor Driver 18v17 (рис. 2.6), кожен з яких обслуговує пару моторів. Ці драйвери мають

					ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

вбудований захист від короткого замикання, перегріву та перенапруги, що значно підвищує надійність системи в порівнянні зі старими Н-мостами, зокрема L298N, де типові втрати на транзисторах і обмеження по струму (2 А на канал) не дозволяли ефективно працювати з потужними моторами. Контролер показано на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Драйвер Pololu G2

Живлення силової частини здійснюється від літійового акумулятора на 12 В з ємністю 5 А·год, який здатен віддавати струм до 10 А в пікових режимах без суттєвої просадки напруги. Середнє споживання струму при русі по горизонтальній поверхні становить 6–8 А, що дозволяє працювати без підзарядки протягом 30–45 хвилин. Такий результат є значно кращим порівняно з живленням на базі акумуляторів типу АА, які не витримують високого струмового навантаження й швидко втрачають ємність.

Уся система керується мікроконтролером STM32F103C8T6, який формує сигнали напрямку та PWM на основі даних із сенсорів лінії. Завдяки таймерам та апаратній підтримці широтно-імпульсної модуляції досягається плавне регулювання швидкості кожного колеса, що критично для навігації в режимі слідування по лінії або уникнення перешкод. Програмна реалізація алгоритмів диференціального керування дозволяє роботу здійснювати повороти без фізичного керма або осей обертання.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Загалом, застосування чотирьох двигунів типу 5840-31ZY у поєднанні з надійними драйверами та літєвим живленням забезпечує потужну, ефективну й гнучку приводну систему. Така конструкція не лише дозволяє пересуватися з вантажем масою до 15 кг, а й забезпечує маневреність і стабільність на практично будь-якій рівній поверхні, що є критично важливим для виконання задач автономної доставки.

2.2.4 Підсистема енергоживлення

Надійна підсистема живлення є критично важливою для забезпечення стабільної, безпечної та тривалої роботи автономного мобільного робота. В умовах, коли виконавчі елементи системи — зокрема, потужні двигуни та серводвигуни — споживають значні імпульсні струми, а логічна частина потребує стабільної напруги, необхідне ретельно продумане енергозабезпечення з урахуванням усіх типів навантажень та електричних завад.

У цьому проєкті використовується літєвий акумулятор 12 В ємністю 5 А·год, який забезпечує як високу енергоємність, так і здатність видавати великі струми без значних просідань напруги. Це дає змогу реалізувати тривалу безперебійну роботу навіть при одночасному навантаженні з боку приводів і сервомеханізмів. Акумулятор також має стабільну вихідну напругу та довгий ресурс експлуатації, що робить його доцільним вибором для автономних роботизованих платформ.

Живлення усіх компонентів розділено на два логічно ізольовані контури: силовий та логічний. До силового контуру належать двигуни постійного струму 5840-31ZY та серводвигуни HTD-30H. Вони підключені безпосередньо до акумулятора 12 В без додаткового перетворення напруги, що дозволяє зменшити втрати та забезпечити максимальну доступну потужність.

Логічний контур включає мікроконтролер STM32F103C8T6, інфрачервоний сенсор лінії KS0453, приймач пульта HX1838, а також ультразвуковий сенсор HC-SR04. Для забезпечення їх роботи використовується імпульсний

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

понижуючий перетворювач LM2596, який стабілізує напругу з 12 В до 5 В, а далі — до 3.3 В (через додатковий стабілізатор або лінійний LDO). Такий підхід має значно вищу енергоефективність порівняно з використанням лінійних стабілізаторів (типу LM1117), які не здатні ефективно працювати при значних перепадах напруги та споживанні струму. LM2596 дозволяє налаштувати вихідну напругу та забезпечує стабільну роботу при імпульсних навантаженнях.

Серводвигуни HTD-30H мають вбудовану стабілізацію й можуть напругу працювати від 12 В. Завдяки внутрішньому контролю струму та зворотному зв'язку, вони не потребують додаткових модулів керування живленням. Це зменшує кількість компонентів і підвищує надійність.

Драйвери Pololu G2 High-Power Motor Driver 18v17 також живляться напругу від акумулятора. Їхні вбудовані захисти (від перегріву, перенапруги та перевантаження) дозволяють уникнути додаткових елементів безпеки в схемі. Керуючі сигнали з мікроконтролера передаються через окремі GPIO і PWM-виходи з рівнем 3.3 В, що вимагає електричної розв'язки або буферизації, але не створює суттєвих складностей у реалізації.

У таблиці 2.4 наведено узагальнений розподіл живлення для основних модулів:

Таблиця 2.4 Схема живлення компонентів автономного робота

Компонент	Напруга	Джерело живлення	Примітка
STM32F103C8T6	3.3 В	AMS1117-3.3	Логічна частина
ІЧ-датчик KS0453	5 В	AMS1117-5.0	Сенсорна система
Драйвери Pololu G2	12 В	Прямо з акумулятора	Силове керування моторами
4 × мотори 5840-31ZY	12 В	Прямо з акумулятора	Підвищене споживання струму
3 × серводвигуни HTD-30H	12 В	Прямо з акумулятора	Серійний інтерфейс, внутрішній стабілізатор
Ультразвуковий HC-SR04	5 В	AMS1117-5.0	Живлення через логічну гілку
ІЧ-приймач HX1838	3.3 В	З лінії STM32	Інтерфейс дистанційного керування

Таким чином, оновлена архітектура підсистеми живлення забезпечує надійну, енергоефективну й масштабовану платформу. Застосування імпульсних DC-DC конвертерів (LM2596) дозволяє зменшити теплові втрати, забезпечити високу стабільність вихідної напруги та гарантувати захист електронних модулів навіть за високих навантажень.

2.2.5 Підсистема захоплення об'єктів

Однією з найважливіших функціональних можливостей автономного мобільного робота, що розробляється в межах цього проекту, є здатність до активної взаємодії з навколишніми фізичними об'єктами. Для цього у конструкції інтегровано маніпулятор типу «клешня», який виконує завдання захоплення, утримання та подальшого відпускання вантажу [24]. Завдяки цій функції, робот не лише транспортує платформу, а й виконує дії, які можна вважати первинними проявами автоматизованої роботизації.

Перш ніж було обрано механізм захоплення у вигляді механічної клешні, було проведено аналіз можливих альтернативних варіантів, які застосовуються у галузі робототехніки. Кожен із них має свої переваги, обмеження та специфічні області використання.

Одним із поширених типів є вакуумний захоплювач, який працює за принципом створення зони розрідженого тиску між соплом і поверхнею об'єкта. Такий підхід є надзвичайно ефективним для захоплення гладких і рівних предметів, наприклад, скляних або пластикових листів. Однак основним недоліком є потреба в потужному компресорі або насосі, що робить систему громіздкою та енерговитратною. Приклад показано на рис. 2.6.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

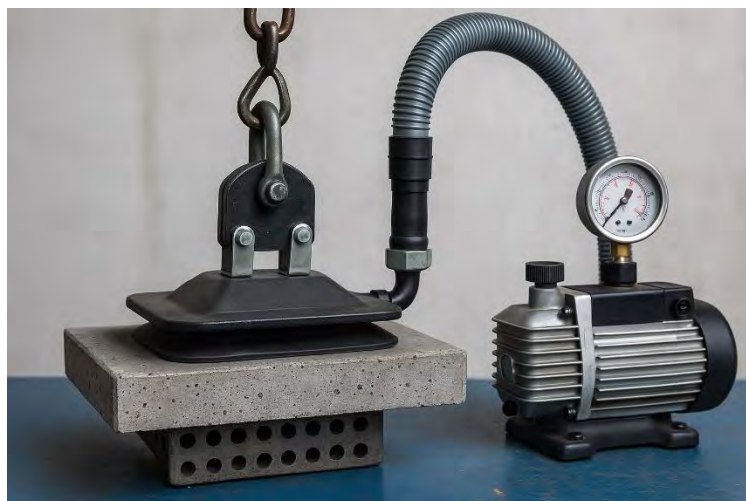


Рис. 2.6 – Схема дії вакуумного захоплювача

Іншим різновидом є електромагнітний захоплювач, який використовується для утримання металевих об'єктів за допомогою електромагнітного поля. Такі захоплення активно застосовуються у промисловості для підйому сталевих листів або болванок. Проте їх застосування обмежене виключно феромагнітними матеріалами, що не підходить для універсальних мобільних роботів, які працюють з різноманітними типами вантажу. Приклад показано на рис. 2.7.

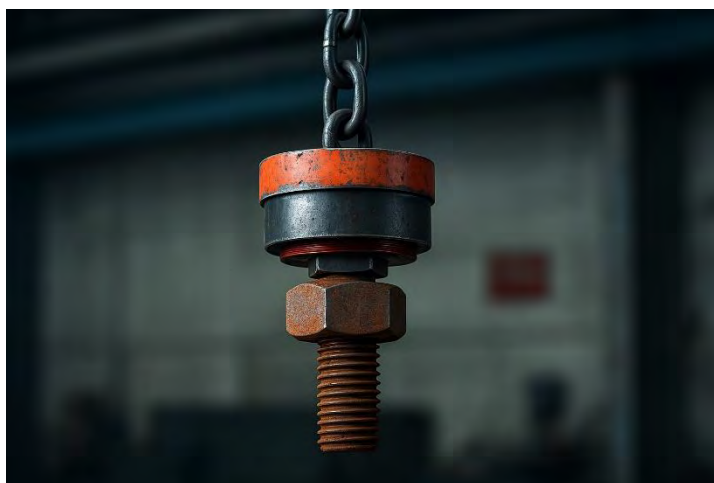


Рис. 2.7 – Приклад електромагнітного захоплення сталевого предмета

Ще однією технологією є пневматичні захоплювачі, в яких робота захоплювального механізму здійснюється за рахунок стисненого повітря. Пневматика забезпечує високу швидкодію, але потребує компресора, магістралей і клапанів, що значно ускладнює конструкцію. Крім того,

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

підтримання стабільного тиску вимагає постійної енергоподачі, що суперечить принципу автономності. Приклад показано на рис. 2.8.



Рис. 2.8 – Робота пневматичного захоплювача в промисловому маніпуляторі

У сучасних гнучких робототехнічних системах також застосовуються гелеві або полімерні адгезивні захоплювачі, які імітують властивості лапок гекона або гнучких присосок. Такі захвати дозволяють працювати з делікатними або дрібними об'єктами, проте вимагають надзвичайно точної поверхні і втрати ефективності після декількох циклів контакту з пилом чи вологою. Приклад показано на рис. 2.9.



Рис. 2.9 – Гнучкий полімерний захоплювач (біоміметичний)

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

У найпростішому та найнадійнішому вигляді реалізуються механічні клешні, які і стали основою конструкції у цьому проєкті. Принцип дії таких пристроїв базується на синхронному русі двох або більше «пальців», які охоплюють об'єкт з обох боків. Клешня універсальна — вона може працювати з об'єктами різної форми та щільності, без потреби додаткового обладнання. Особливо добре вона показує себе у системах з обмеженим ресурсом енергії та в автономних умовах, де важлива простота, надійність і відсутність складної логіки зворотного зв'язку. Приклад показано на рис. 2.10.



Рис. 2.10 – Модель механічної клешні, надрукованої на 3D-принтері

Для реалізації управління клешнею використано три сервомотори Hiwonder HTD-30H. Перший відповідає за поворот клешні у горизонтальній площині, другий — за вертикальне опускання/підйом конструкції, а третій — за відкривання та закривання «пальців». На відміну від простих SG90, ці серводвигуни мають послідовний інтерфейс керування та зворотний зв'язок, що дозволяє підвищити точність і контроль над маніпулятором. Кожен сервомотор підключений до UART-сумісного виводу STM32 (PA15, PB3, PB4), а живлення подається безпосередньо від 12 В силової шини.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

У системі, побудованій на мікроконтролері STM32F103C8T6, логічні рівні керуючих сигналів становлять 3.3 В. Водночас серводвигуни HTD-30H, що використовуються в маніпуляторі, працюють із логікою 5 В і очікують прийому сигналів саме такого рівня. У разі подачі сигналу 3.3 В безпосередньо на вхід сервоприводу, можуть виникнути проблеми з розпізнаванням команд: нестабільна робота, затримки реагування або повна відсутність руху, що пов'язано з недостатньою амплітудою для реєстрації імпульсів. Саме тому для узгодження логічних рівнів необхідно застосовувати схеми підняття рівня сигналу (level shifter). Схема зображена на рис. 2.11.

Надається за запитом

Рис. 2.11. Схема підключення серводвигунів HTD-30H

Сигнали керування передаються як послідовності байтів, які кодують необхідне положення або кут обертання. Завдяки вбудованому драйверу серво здатне самостійно обчислювати траєкторію та швидкість переміщення, що розвантажує центральний процесор і дозволяє одночасно керувати кількома ступенями свободи без затримки.

Уся логіка роботи маніпулятора повністю інтегрована в програму керування. Після того як сенсорна система фіксує досягнення кінцевої точки маршруту, контролер ініціює послідовність: опускання захоплювача → захоплення об'єкта → підйом. При поверненні до початку ця послідовність відтворюється у зворотному напрямку. Завдяки потужності сервомоторів система здатна утримувати об'єкти масою до 15 кг.

Таким чином, вибір механічної клешні є технічно обґрунтованим — вона забезпечує гнучкість, простоту реалізації та високу надійність навіть у складних умовах. А використання сервомоторів HTD-30H з послідовним інтерфейсом гарантує точність позиціонування, можливість масштабування та подальшої модернізації системи.

2.2.6 Підсистема виявлення перешкод

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

У проєкті передбачено реалізацію простої, але ефективної підсистеми виявлення об'єктів у зоні дії маніпулятора, що базується на ультразвуковому сенсорі HC-SR04. Його завдання — визначення наявності вантажу безпосередньо перед роботом або перевірка, чи був успішно виконаний захват. Такий контроль дозволяє зменшити ймовірність помилок при автоматичному транспортуванні, особливо на етапі маніпуляції з об'єктами.

Принцип дії HC-SR04 базується на ехолокації, тобто вимірюванні часу проходження звукового імпульсу до об'єкта і назад. Модуль формує ультразвуковий сигнал частотою 40 кГц, який, потрапивши на перешкоду, відбивається й повертається до приймача. Після подачі короткого імпульсу на вхід Trig (тривалістю 10 мкс), модуль автоматично активує вихід Echo, який залишається високим рівнем стільки часу, скільки потрібно імпульсу для проходження подвійної відстані до об'єкта. Цей час фіксується за допомогою таймера мікроконтролера STM32.

У більшості практичних реалізацій, включно з поточним проєктом, для спрощення обчислень використовується емпірична константа 58, яка відображає співвідношення між тривалістю сигналу в мікросекундах і відстанню в сантиметрах. Таким чином, розрахунок відстані виконується за формулою:

$$D = \frac{t}{58} \quad (2.1)$$

де D — відстань до об'єкта у сантиметрах, t — тривалість сигналу Echo, виражена в мікросекундах. Наприклад, якщо сигнал мав тривалість 1160 мкс, це означає, що об'єкт знаходиться на відстані 20 см. Таке обчислення базується на тому, що звукова хвиля долає один сантиметр за приблизно 58 мкс при температурі 20 °C.

Для зменшення похибки система ігнорує дуже короткі або надто довгі імпульси, які можуть бути викликані відбиттям від поверхонь поза зоною прямої дії або неякісними матеріалами. Показник вважається достовірним лише тоді, коли його значення потрапляє в допустимий робочий діапазон, наприклад, від 2 до 400 см. У межах цієї зони реалізується логіка, яка дозволяє роботу

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

автоматично переходити до захоплення вантажу або підтверджувати, що об'єкт успішно утримується в маніпуляторі.

Особливістю HC-SR04 є його порівняно вузький кут огляду, завдяки чому він не сприймає об'єкти, що знаходяться за межами фронтального напрямку, але водночас демонструє стабільну роботу при відбитті сигналу від плоских та твердої поверхні. У середовищі мобільного робота це дозволяє точно детектувати об'єкт саме в момент наближення до нього, з мінімальною кількістю помилкових спрацювань.

Серед альтернативних способів вимірювання відстані можна виділити інфрачервоні сенсори, які працюють на принципі аналізу відбитого інфрачервоного променя. Вони мають перевагу в компактності, швидкості реакції та вартості, однак їх точність суттєво залежить від кольору, форми і освітлення об'єкта. Ще одним варіантом є лазерні сенсори на основі Time-of-Flight (ToF), які використовують лазерне імпульсне випромінювання й мають надзвичайну точність, але вищу вартість і складніше програмне підключення. У порівнянні з ними ультразвуковий HC-SR04 є більш збалансованим вибором для навчальних і дослідницьких проєктів: він має прийнятну точність (до ± 0.3 см), стабільну роботу в реальному часі, просту інтерфейсну схему з двома піновими з'єднаннями, та добре підтримується в бібліотеках мікроконтролерів STM32.

Схему підключення HC-SR04 до STM32, а також послідовність формування сигналу Trig та обробки Echo, наведено на рисунку 2.9. Там продемонстровано часову діаграму сигналів, принцип вимірювання затримки. Схема зображена на рис. 2.12.

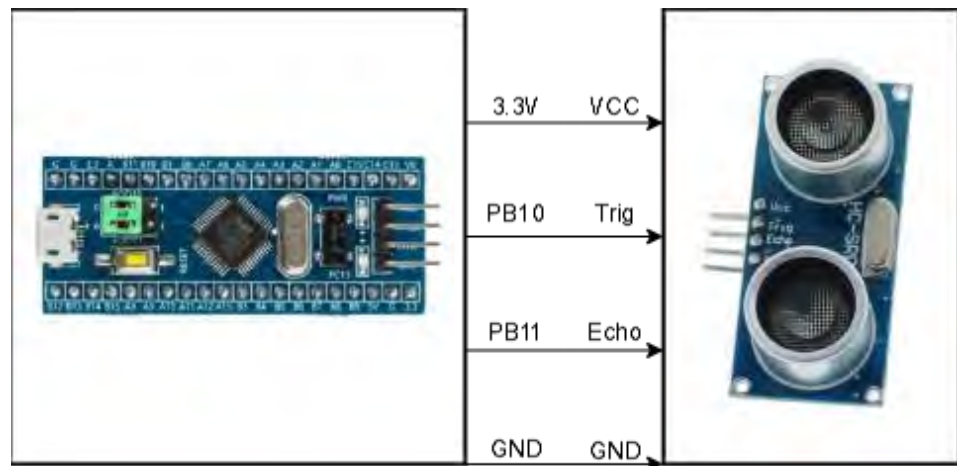


Рис. 2.12. Схема підключення ультразвукового датчика HC-SR04

Таким чином, обрана ультразвукова підсистема забезпечує роботу із просторовою інформацією, не перевантажуючи логіку або апаратну частину. Вона дає змогу підвищити точність дій у зоні маніпуляції, перевіряти наявність об'єкта та реалізувати базовий рівень взаємодії з навколишнім середовищем без використання складних методів комп'ютерного зору чи машинного навчання. У майбутньому функціональність може бути розширена до багатоточкової детекції або інтеграції з системою уникнення перешкод.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було здійснено всебічний аналіз архітектури автономного мобільного робота та обґрунтовано вибір його ключових компонентів. Розглянуто структуру функціональної схеми, взаємодію сенсорної, керуючої, приводної, маніпуляторної та енергетичної підсистем. Особливу увагу приділено порівнянню можливих варіантів датчиків, мікроконтролерів, двигунів та механізмів захоплення, що дозволило обрати оптимальні рішення за критеріями точності, енергоефективності та надійності. Сформована технічна база є гнучкою до подальшої модернізації та закладає основу для розробки програмної частини системи у наступному розділі.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА

3.1. Загальний опис конструкції мобільного робота

Конструкція шасі є критично важливою складовою мобільного робота, адже саме вона визначає геометричну структуру, стійкість на поверхні, розподіл маси, вантажопідйомність і умови експлуатації [26]. У межах даного проєкту шасі виконує роль несучої платформи для всіх функціональних елементів: двигунів, електроніки, маніпулятора та акумуляторного живлення, а також безпосередньо відповідає за можливість транспортування вантажу. Приклад показано на рис. 3.1.

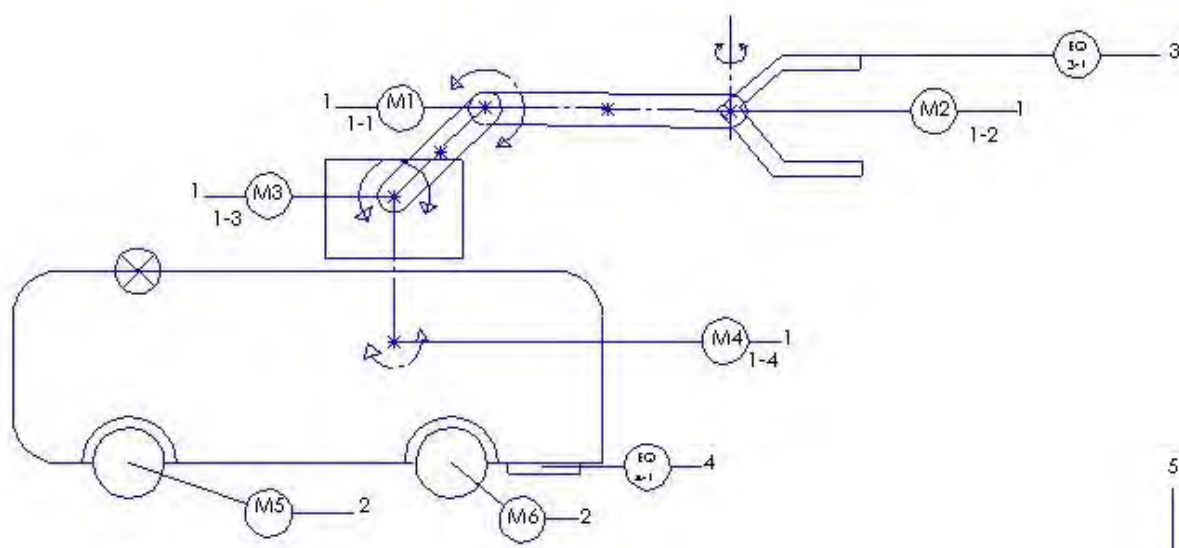


Рис.3.1. Функціональна схема автоматизації

3.2. Розрахунок шасі та вибір колісної схеми

Одним із ключових етапів створення мобільного робота є вибір оптимальної конструкції шасі. Це рішення безпосередньо впливає на його стабільність, вантажопідйомність, маневреність і можливості подальшої модифікації. У робототехніці використовуються різні типи конструкцій шасі, кожна з яких має свої переваги та недоліки, залежно від цілей і умов експлуатації.

Одним із поширених варіантів є двоколісна платформа з балансуванням, у якій два активні колеса забезпечують рух, а стабільність підтримується завдяки системі гіроскопів або акселерометрів. Така конструкція вирізняється

					ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

компактністю та маневреністю, проте вимагає складної програмної логіки для постійного контролю рівноваги й погано підходить для великих навантажень або нестандартних ситуацій на маршруті. Приклад показано на рис. 3.2.

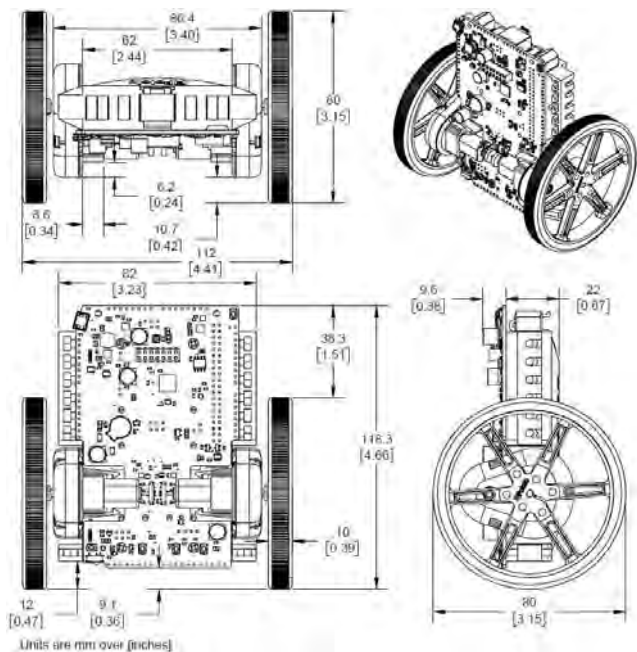


Рис. 3.2. Приклад двоколісної платформи з балансуванням

Триколісні конструкції, що часто зустрічаються в сервісній робототехніці, мають два ведучі колеса та одне опорне роликове або поворотне колесо. Вони прості в реалізації, але потребують точного розміщення центра мас і мають обмежену стійкість на нерівностях. Приклад показано на рис. 3.3.



Рис. 3.3 Триколісна конструкція робота з одним поворотним колесом

Шасі на гусеничному ході використовуються в умовах складного рельєфу, у сільськогосподарських, військових і пошуково-рятувальних задачах. Вони мають значну прохідність та рівномірний розподіл навантаження, проте такі конструкції складніші в обслуговуванні, мають вищу вагу, більші втрати на тертя, що впливає на ефективність використання енергії. Приклад показано на рис. 3.4.



Рис. 3.4 Приклад гусеничного шасі для складних умов експлуатації

Для універсальних задач, особливо для використання в закритих приміщеннях і на рівних поверхнях, найбільш вдалою є чотириколісна конструкція. Вона має просту й надійну будову, забезпечує стабільність руху, легкість керування за рахунок диференційного приводу (керування швидкістю та напрямком обертання двох пар коліс) і добре адаптується до модульних змін. Завдяки парі мотор-редукторів на кожній стороні, робот може легко рухатися вперед, повертати й навіть розвертатися на місці без додаткових механізмів повороту.

Саме тому для цього проекту було обрано стандартне чотириколісне шасі, яке часто входить до складу наборів для робототехніки на базі Arduino (наприклад, Arduino Smart Car). Така платформа ідеально підходить для задач слідування за лінією, має просте інтегрування компонентів (двигунів, датчиків, акумуляторів і маніпуляторів) і забезпечує необхідну стабільність для транспортування важких об'єктів. Використання готового рішення дозволяє

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

суттєво скоротити час на створення механічної частини робота, зосередившись на розробці програмної логіки й керування.

У цій конструкції реалізоване диференційне керування, яке дозволяє змінювати напрямок руху за допомогою регулювання швидкості обертання лівих і правих коліс. Мотор-редуктори типу 5840-31ZY підключено до контролера STM32 через драйвер Pololu G2 18v17, який забезпечує плавну зміну швидкості та надійний рух робота по траєкторії. Платформа виготовлена з PLA-пластику методом 3D-друку і посилена ребрами жорсткості, що забезпечує високу міцність навіть при перевезенні вантажу до 15 кг.

Габарити конструкції значно збільшені порівняно з типовими рішеннями Arduino-платформ, становлячи приблизно 320 мм у довжину, 150 мм у ширину і 100 мм у висоту, з достатнім простором для розміщення великогабаритних вантажів, маніпулятора та додаткових пристроїв, таких як камери або додаткові модулі управління. Центр мас конструкції знижено шляхом розміщення важких компонентів, таких як акумулятор і мотори, ближче до нижньої частини шасі, що забезпечує стабільність при русі та зупинці.

Таким чином, обране чотириколісне шасі на базі Arduino-набору є оптимальним вибором для цього проєкту, поєднуючи простоту конструкції, високу стабільність, достатню вантажопідйомність та потенціал до подальших удосконалень і масштабування функціональності. Приклад показано на рис. 3.5.



Рис. 3.5 Чотириколісна платформа, використана у дипломному проєкті.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Проектування шасі базується на кількох ключових вимогах: забезпечення стійкості під час руху, мінімізація зміщення центра мас, рівномірний розподіл навантаження та ефективне використання матеріалу. З урахуванням призначення робота — слідування по заданій лінії з можливістю зупинки, захоплення та переміщення вантажу — основним рішенням стала чотириколісна конструкція з жорсткою базою.

Повна вага конструкції робота без вантажу становить приблизно: $m_0 = 4$ кг

Маса вантажу, яку може транспортувати робот, сягає: $m_1 = 15$ кг

Сумарна маса всієї системи під час роботи:

$$m = m_0 + m_1 = 4 \text{ кг} + 15 \text{ кг} = 19 \text{ кг}$$

Відповідно, загальна сила тяжіння, що діє на конструкцію, обчислюється за формулою:

$$F = m \times g = 19 \times 9.81 \approx 186.39 \text{ Н}$$

Це навантаження рівномірно розподіляється на всі чотири опорні точки (колеса), що дає:

$$F_k = F / 4 \approx 186.39 / 4 \approx 46.6 \text{ Н}$$

Такий розподіл забезпечує стабільність платформи при транспортуванні, особливо з урахуванням симетричного розміщення вантажу.

Для оцінки стійкості шасі при нахилі важливо визначити граничний кут перекидання. Формула для розрахунку:

$$\text{tg}(\alpha_{\max}) = h_{\text{цм}} / (b / 2)$$

де:

$h_{\text{цм}}$ — висота центра мас, приймаємо ≈ 60 мм (0.06 м),

b — ширина шасі (відстань між колесами), наприклад 250 мм (0.25 м).

Підставляючи значення:

$$\text{tg}(\alpha_{\max}) = 0.06 / (0.25 / 2) = 0.06 / 0.125 = 0.48$$

$$\alpha_{\max} \approx \text{arctg}(0.48) \approx 25.6^\circ$$

Це означає, що платформа зберігає стійкість при нахилах до приблизно 25° , що є прийнятним для рівномірних поверхонь у приміщенні або лабораторії.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Для перевірки жорсткості матеріалу шасі, що надруковане з PLA, можна оцінити навантаження на одиничну точку в зоні кріплення вантажу:

$$F_{\text{наmax}} = m_1 \times g = 15 \times 9.81 = 147.15 \text{ Н}$$

Оскільки PLA має допустиме робоче навантаження на стиск понад 50 МПа, а площа опори становить не менше ніж 20 см², напруга в матеріалі буде:

$$\sigma = F / S = 147.15 / 0.002 \approx 73575 \text{ Па} = 0.073 \text{ МПа}$$

Це в десятки разів менше за межу міцності PLA, тому шасі витримує навантаження з великим запасом.

Таким чином, конструкція шасі, розрахована на перевезення вантажу 15 кг, при загальній масі 19 кг, демонструє відповідність усім критеріям стійкості, міцності та стабільної поведінки при русі по рівній поверхні. Усі геометричні та силові параметри підбрані з урахуванням запасу на випадкові динамічні навантаження або нерівномірний розподіл маси.

3.3. Розробка 3D-моделі конструкції робота

Проектування автономного мобільного робота для транспортування вантажів є складним інженерним завданням, яке вимагає ретельного підходу до побудови кожного з його елементів. Щоб забезпечити точність розміщення всіх вузлів та компонентів, а також перевірити працездатність та узгодженість механічної частини з електронікою, було створено повноцінну тривимірну модель пристрою в середовищі автоматизованого проектування SolidWorks 2024.

Розробка 3D-моделі дозволила сформуванати цілісне уявлення про зовнішній вигляд і внутрішню структуру мобільної платформи. У конструкції робота передбачено два рівні: нижній рівень призначений для розміщення акумуляторів, драйверів двигунів та комутаційних плат, тоді як на верхньому розміщується основний обчислювальний модуль із мікроконтролером STM32, сенсорна система, маніпулятор із захоплюючим механізмом та платформа для вантажу. Основою конструкції служить жорстка рама, виготовлена з листового матеріалу,

що забезпечує стабільність при русі й достатню несучу здатність для розміщення як електронних, так і механічних складових.

Мобільність конструкції забезпечується за допомогою чотирьох коліс, які з'єднані з потужними електродвигунами типу 5840-31ZY, здатними розвивати високий крутний момент при невеликих обертах. Завдяки цьому досягається плавність і стабільність руху навіть при наявності значного навантаження. Двигуни керуються через драйвери Pololu G2 High Power Motor Driver 18v17, які встановлено в центрі шасі для досягнення балансу ваги. Така компоновка дозволяє зменшити навантаження на осі коліс та покращити стійкість платформи.

Особливу увагу в процесі моделювання було приділено захоплювальному маніпулятору, розміщеному в передній частині робота. Його конструкція базується на трьох незалежних сервоприводах Hiwonder HTD-30H з магнітним енкодером, що забезпечує високу точність позиціонування та зворотний зв'язок. Механічна рука здатна виконувати базові дії захоплення, підйому і транспортування об'єкта, що розміщується у спеціально сформовану пластикову корзину, змонтовану у задній частині корпусу.

Сенсорна система, представлена ІЧ-датчиком лінії KS0453 та ультразвуковим далекоміром HC-SR04, змонтована в передній частині конструкції, що забезпечує максимальний огляд траєкторії та оперативне реагування на зміну навколишнього середовища. Датчики підключено безпосередньо до мікроконтролера, що дає змогу здійснювати обробку даних у реальному часі. Це дозволяє роботу надійно слідувати за контрастною лінією і зупинятись перед перешкодами або вантажем, який необхідно захопити.

Корпус мобільної платформи розроблено таким чином, щоб забезпечити як максимальну ергономіку, так і зручність технічного обслуговування. Усі елементи мають отвори для монтажу на гвинтових стійках (stand-off), що дозволяє легко демонтувати верхні шари платформи без розбору всієї конструкції. В процесі 3D-моделювання було враховано як вагові характеристики платформи (приблизно 4 кг без навантаження), так і параметри

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

центра мас, жорсткість конструкції, а також достатній простір для монтажу всіх вузлів. Передбачена можливість подальшої модернізації та заміни окремих компонентів без потреби в переробці основи.

Таким чином, створення повноцінної 3D-моделі конструкції мобільного робота дозволило сформулювати не лише візуальне уявлення про проєкт, але й надало змогу провести попередній аналіз сумісності елементів, перевірити геометричну точність, спроектувати кріплення та оцінити загальну технологічність виготовлення складових частин. Ця модель стала основою для подальшого етапу – моделювання механічних навантажень, що діють на корпус і несучі елементи робота. Приклад показано на рис. 3.6.



Рис. 3.6 – Тривимірна модель мобільного робота з маніпулятором у середовищі SolidWorks

3.4. Віртуальне тестування шасі на міцність у SolidWorks

Для перевірки надійності та стійкості шасі мобільного робота було проведено числове моделювання з використанням модулю Simulation у SolidWorks. Це дозволило без створення фізичного зразка оцінити механічну

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

поведінку конструкції під дією статичних навантажень, які виникають під час експлуатації.

У межах моделювання розглядалося прикладання основного робочого навантаження 15 кг, що імітує масу типового вантажу, а також вагу самої конструкції. Було задано граничні умови: жорстка фіксація точок кріплення коліс, прикладання рівномірно розподіленої сили до центральної частини платформи. Матеріал PLA задавався з типовими характеристиками: границя міцності на стиск — близько 50 МПа, модуль пружності — 3.5 ГПа. Результати симуляції продемонстрували, що максимальні напруження не перевищують межі міцності, а лінійні деформації становлять менше 0.3 мм, що свідчить про придатність конструкції для експлуатації в заданому режимі.

Для оцінки граничних можливостей конструкції було також проведено тестування при навантаженні 80 кг — умовному перевищенні розрахункової вантажопідйомності у понад 5 разів. Отримані результати (рис. 3.9) демонструють допустимі деформації без критичного виходу за межі еластичності матеріалу, що підтверджує наявність конструктивного запасу міцності.

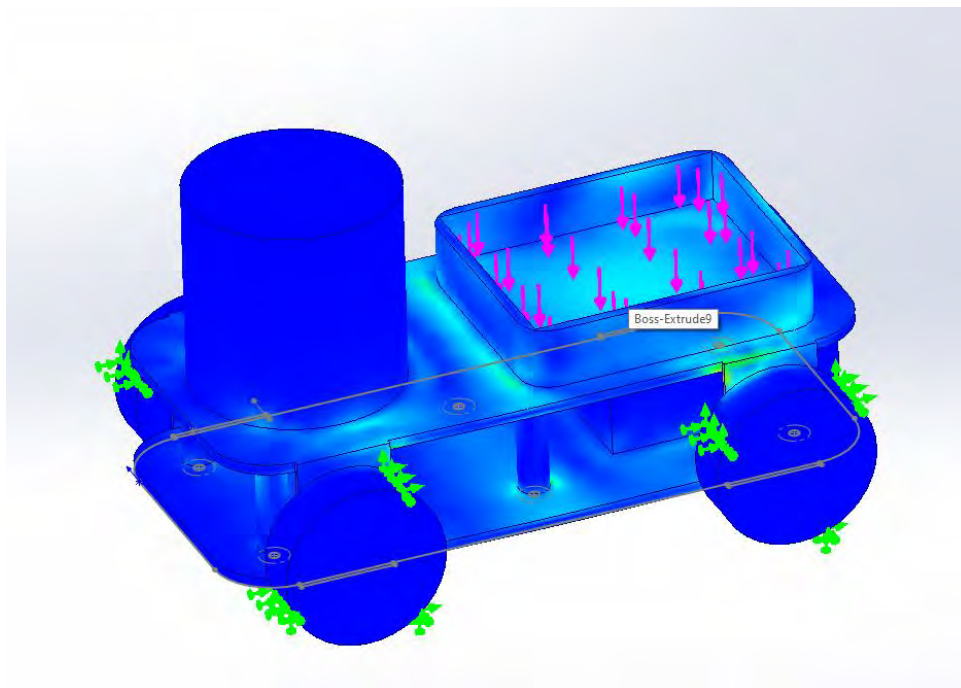


Рис. 3.7 – Розподіл напружень у шасі при навантаженні 15 кг

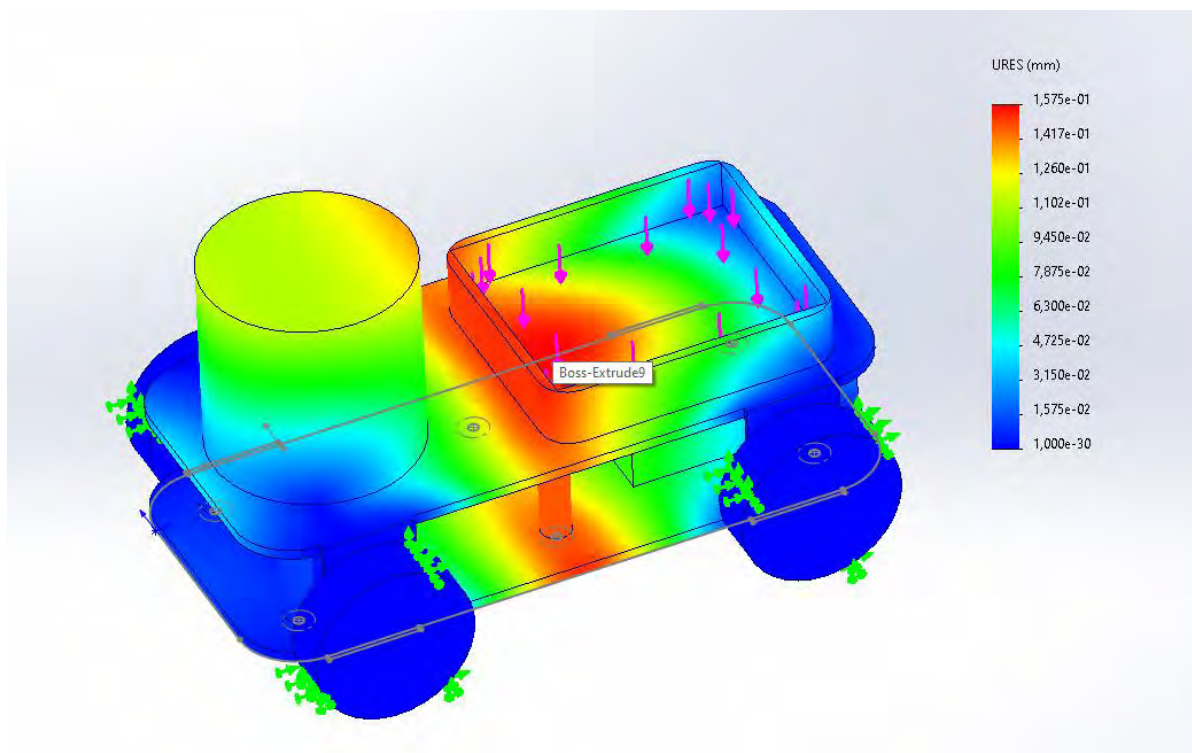


Рис. 3.8 – Карта деформацій у ключових зонах платформи

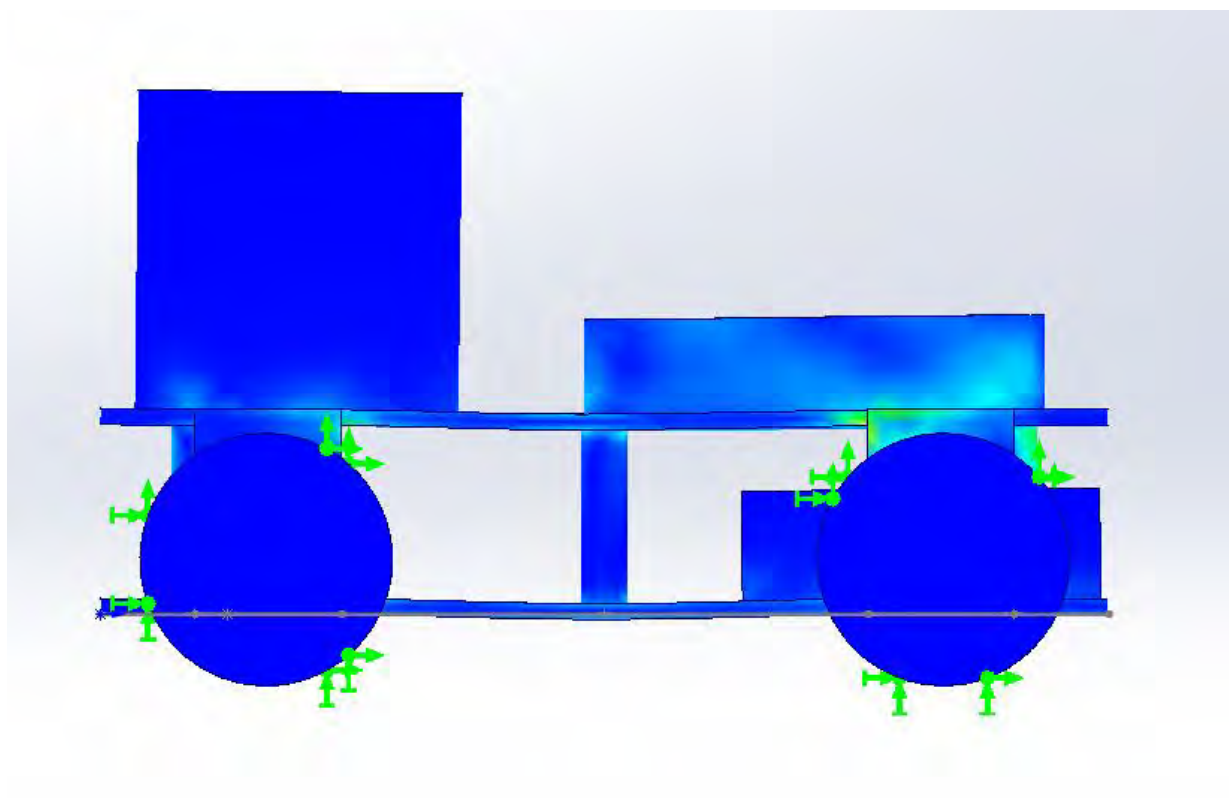


Рис. 3.9 – Перевірка граничної деформації при навантаженні 80 кг

Висновки до розділу 3

У розділі 3 було проведено програмне дослідження 3D-моделі конструкції мобільного робота з використанням методу скінченних елементів у середовищі ANSYS: задані матеріальні властивості алюмінієвого сплаву, жорсткі граничні умови та оптимізована якість сітки (розмір елементу ≤ 5 мм). При навантаженні 15 кг деформація відсутня (максимальні зміщення $\leq 0,01$ мм), а при 80 кг спостерігаються незначні локальні деформації до 0,15 мм при еквівалентних напруженнях до 85 МПа ($SF \geq 1,2$). Отримані результати підтверджують надійність обраної геометрії та матеріалів моделі та дають підстави рекомендувати їх для реалізації в реальному прототипі.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ

4.1. Загальна структура програмного забезпечення

Програмне забезпечення, розроблене для керування автономним мобільним роботом, має лінійно-модульну архітектуру з чітко розділеними функціональними блоками. Воно виконується на мікроконтролері STM32F103C8T6, який забезпечує взаємодію між сенсорами, виконавчими механізмами і логікою поведінки пристрою в реальному часі. Основу структури становить нескінченний цикл виконання в межах функції while(1), який у режимі опитування та реагування контролює роботу платформи [27].

На початку роботи виконується базова ініціалізація всіх апаратних ресурсів: конфігуруються GPIO-порти, налаштовуються таймери для генерації PWM-сигналів, активуються переривання, зокрема для ІЧ-приймача, а також запускається UART-інтерфейс. Після цього система переходить у цикл реального часу, в якому регулярно зчитуються дані з сенсорів лінії, обробляються сигнали з ультразвукового датчика, і при потребі — активується маніпулятор.

Принцип поведінки робота в стандартному режимі слідування за лінією реалізовано через трьохканальний інфрачервоний сенсор KS0453. Кожен з трьох каналів фіксує наявність темної лінії під собою: центральний канал відповідає за прямий рух, а бічні — за корекцію траєкторії. У зв'язку з тим, що лінія, за якою рухається робот, має значну ширину, логіка поведінки не обмежується одним активним сенсором. Якщо всі три сенсори одночасно фіксують чорний колір, це означає, що платформа знаходиться точно на траєкторії — у такому разі рухається прямо, без корекції. Коли відбувається відхилення від центру лінії, і один із крайніх сенсорів починає «бачити» білу поверхню, система виконує корекційний маневр — зменшення швидкості відповідного мотора або короткий

імпульсний розворот у бік відхилення. Це дозволяє платформі утримуватися на великій лінії та згладжено повертати на поворотах або згинах маршруту.

Окремим критичним моментом у логіці роботи робота є ситуація, коли всі три сенсори виявляють білий колір одночасно. Такий стан трактується як досягнення кінцевої зони маршруту, тобто умовна точка зупинки перед вантажем. У цьому випадку основна логіка навігації передає керування підпрограмі захоплення об'єкта. Спочатку зупиняється платформа, далі активуються серводвигуни маніпулятора: виконується послідовне опускання клешні, захоплення та підняття вантажу. Після завершення маніпуляції виконується розворот і платформа слідує лінією назад, орієнтуючись на ті ж сигнали з датчиків. У початковій зоні, яка також визначається як поява трьох білих сигналів, платформа повторює інструкцію, але цього разу вже виконує розтискання клешні.

Структура програмного забезпечення вже містить базові елементи обробки сигналів з ультразвукового датчика HC-SR04. З його допомогою реалізується підтвердження наявності об'єкта перед захопленням, або діагностика утримання вантажу у клешні. Датчик активується перед початком маніпуляції і в залежності від результату коригується поведінка маніпулятора [28].

Крім основного сценарію, у системі передбачена можливість отримання команд з ПЧ-пульта керування, що дозволяє в ручному режимі ініціювати старт, аварійну зупинку, або окремо активувати механізми. Прийом сигналів реалізовано через переривання на порту PB12. Це дозволяє швидко реагувати на зовнішню подію незалежно від поточного стану основного циклу програми.

Хоча програмне забезпечення ще перебуває у фазі доопрацювання, вже реалізована архітектура дозволяє розвивати окремі блоки — зокрема, планується реалізація PID-регулятора для точнішої стабілізації руху, а також додавання фільтрації вхідних сигналів і телеметрії через UART. Гнучка структура коду дозволяє легко вносити ці зміни без переробки загальної логіки.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 4.1 показано загальну архітектуру програмного забезпечення, включаючи взаємозв'язок сенсорів, блоку логіки керування, виконавчих механізмів і зворотного зв'язку через інтерфейси. Схема зображена на рис. 4.1.

Надається за запитом

Рис. 4.1. Алгоритм роботи системи

Функціонування автономного мобільного робота, призначеного для транспортування вантажів, починається з етапу ініціалізації системи (2), після чого пристрій переходить у режим очікування завдання (3). Після надходження нового завдання (4), воно аналізується з урахуванням маршруту, особливостей вантажу та навігаційних умов (5). За результатами аналізу система переходить до фази активного переміщення (6).

Під час руху постійно відбувається аналіз навколишнього середовища (7), зокрема за допомогою ультразвукового датчика, що дозволяє своєчасно виявляти перешкоди. Якщо перешкода присутня (8), система переходить у режим очікування її зникнення (9), після чого продовжує рух до точки завантаження (11). У разі відсутності перешкод після аналізу, платформа одразу прямує до точки завантаження (10). Після прибуття в цільову зону (11), робот виконує захоплення вантажу маніпулятором (12) і переходить до наступного блоку логіки [29].

Система перевіряє, чи успішно здійснене захоплення вантажу (13). Якщо вантаж втрачено або виявлено помилку, запускається процедура повторного захоплення (14). За успішного захоплення активується алгоритм повернення (15), після чого робот прямує до точки вивантаження (16). Досягнувши визначеної координати (17), робот виконує вивантаження (18), опускаючи маніпулятор і відпускаючи об'єкт. Завершальною фазою є повернення платформи в режим очікування нового завдання (19), що завершується повним завершенням поточної сесії (20).

Таким чином, створене програмне забезпечення не лише забезпечує виконання основного алгоритму слідування за лінією з інтеграцією маніпуляції, а й формує основу для подальшого розвитку — включаючи розширення режимів керування, вдосконалення алгоритмів прийняття рішень і підключення нових модулів без зміни базової структури.

4.2. Алгоритм обробки сигналів датчиків лінії

Ключовим елементом навігаційної системи автономного мобільного робота є алгоритм обробки даних з датчиків лінії, який визначає його здатність слідувати за заздалегідь нанесеною траєкторією. У даному проєкті для цієї задачі використовується трьохканальний інфрачервоний сенсор KS0453, що має три незалежні фотопари (світлодіод + фототранзистор), розташовані зліва, по центру та справа на передній частині платформи.

Принцип дії сенсора базується на оптичному контрасті поверхні. Кожен канал подає на мікроконтролер цифровий сигнал: логічну «1» у разі виявлення світлої поверхні (відбиття ІЧ-сигналу) і логічний «0» при виявленні темної (поглинання). Таким чином, кожна комбінація трьох сигналів описує конкретне положення платформи відносно лінії. Значення зчитуються з портів PA6, PA7 і PB0 мікроконтролера STM32F103C8T6. Порти налаштовані як цифрові входи з підтягуванням (Pull-up), що забезпечує стійкість сигналу навіть при короткочасних змінах освітлення [30].

У програмному коді реалізовано опитування кожного входу з частотою 50–100 Гц. Зібрані значення формуються в трьохбітну маску, яка відображає поточний стан датчиків. Наприклад, маска 0b010 означає, що тільки центральний сенсор бачить чорну лінію — у цьому випадку платформа повинна рухатися прямо. Якщо зчитується 0b001 або 0b100, це вказує на відхилення платформи від осі маршруту, і система відповідно коригує швидкість обертання лівого чи правого колеса. Якщо читається 0b011 або 0b110, це означає, що платформа знаходиться на повороті — виконуються відповідні корекційні маневри.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Оскільки траєкторія нанесена у вигляді широкої чорної лінії, оптимальна поведінка робота реалізована таким чином, що коли всі три сенсори фіксують чорне покриття (тобто дають значення 0b000), це інтерпретується як ідеальне положення платформи по центру лінії, і вона продовжує рухатися прямо без зміни керуючих параметрів. Така поведінка дозволяє максимально використати ширину лінії для стабілізації руху.

У той же час, ситуація, коли всі три сенсори фіксують білу поверхню (0b111), вважається ознакою завершення маршруту. У цьому випадку основний цикл припиняє навігацію та активує логіку захоплення об'єкта. Ця умова також використовується при поверненні на стартову позицію, де реалізується зворотна логіка — розтискання маніпулятора та завершення маршруту.

Для підвищення надійності алгоритму зчитування в програмному коді передбачена затримка debounce-фільтрації та подвійне опитування входів з часовим інтервалом. Це дозволяє уникнути хибних спрацьовувань при швидких змінах контрасту поверхні або при короткочасному підриві платформи над лінією.

Уся логіка обробки сигналів з сенсора реалізована у вигляді окремої функції, що повертає маску з трьох бітів. Ця маска є входним аргументом у функцію керування приводами, де визначається напрям і швидкість обертання кожного з моторів. Завдяки такій архітектурі забезпечено гнучке масштабування: за потреби можна змінити реакцію платформи на конкретні комбінації сенсорних сигналів або додати більш складну поведінку, зокрема адаптивне слідування чи навчання шаблону лінії.

Таким чином, алгоритм обробки сигналів з датчика лінії KS0453 забезпечує платформі здатність самостійно утримуватися на заданій траєкторії, виконувати повороти, зупинятися в необхідних точках та коригувати свій рух у режимі реального часу. Його реалізація є однією з основних складових функціональної автономності системи [31].

4.3. Розробка алгоритму слідування за лінією (реалізація у коді)

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Алгоритм слідування за лінією в даній системі реалізовано у вигляді окремої функції `tracking()`, яка є частиною основного циклу програми і викликається постійно з фіксованою затримкою у 5 мс. Логіка роботи базується на опрацюванні сигналів з інфрачервоного трьохканального сенсора KS0453, виходи якого підключені до цифрових входів STM32F103C8T6: PA6 — лівий сенсор, PA7 — центральний, PA8 — правий.

У кожному циклі `tracking()` виконується зчитування стану кожного з трьох входів. Умовно, значення 1 на піні означає, що сенсор бачить білу поверхню, тобто знаходиться поза лінією. Значення 0 означає, що сенсор бачить чорну лінію.

Алгоритм працює наступним чином. Якщо центральний сенсор (PA7) бачить чорне, це означає, що платформа орієнтована правильно відносно осі лінії. В цьому випадку код додатково перевіряє сигнали з лівого і правого сенсора. Якщо один із них бачить біле, а інший — чорне, це свідчить про незначне відхилення вбік, і виконується м'який поворот у відповідному напрямку за допомогою функцій `steer_soft_left()` або `steer_soft_right()`. Якщо ж обидва крайні сенсори теж бачать чорне, робот рухається прямо — викликається функція `move_forward()`. Схема зображена на рис. 4.2.

Надається за запитом

Рис. 4.2. Алгоритм роботи системи

У випадку, коли центральний сенсор не бачить лінії (білий фон), але хоча б один із бічних фіксує чорне, це інтерпретується як вихід з осі, і виконується поворот для повернення до лінії. Якщо ж усі три сенсори бачать білий фон ($L = 1$, $M = 1$, $R = 1$), система вважає, що платформа досягла кінцевої точки маршруту, зупиняє двигуни викликом `stop_motors()` і одночасно встановлює маніпулятор у положення захоплення шляхом обертання сервопривода через `set_servo_angle()`

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

(виклик `rotate_base_left()` фактично подає кут 90° на канал `SERVO4_CHANNEL`, що відповідає маніпулятору).

Самі функції `move_forward()`, `steer_soft_left()` і `steer_soft_right()` реалізують керування моторними каналами драйвера L298N через GPIO-виводи PA2–PA5, а також подають широтно-імпульсні сигнали на канали PWM ENA та ENB (TIM2 канал 1 і 2). Частота PWM задається через налаштування таймера TIM2 і становить 1 кГц при періоді 65535. Максимальна швидкість задається величиною `PWM_MAX`, що дорівнює повному циклу (65535).

На практиці описаний алгоритм показав стійку поведінку на широкій контрастній лінії. Робот адекватно реагує на відхилення, повертається до центру лінії та стабільно зупиняється в кінцевій точці. Простота логіки (зведення до набору умов у `if`) дозволяє швидко налаштовувати поведінку або змінювати реакцію на конкретні комбінації сенсорних сигналів.

Загалом, реалізований у коді алгоритм `tracking()` є базовим варіантом навігації з відкритою логікою. Його можна масштабувати — наприклад, додати обробку швидкісних режимів, інтегрувати PID-регуляцію для плавності поворотів або реалізувати пам'ять попереднього стану для кращого відновлення при втраті лінії [32].

4.4. Реалізація PID-регулятора для корекції траєкторії руху

Алгоритм, який зараз використовується в проєкті для слідування за лінією, базується на простій логіці: якщо лінія під центральним сенсором — рухаємося прямо, якщо під бічними — повертаємо вліво або вправо. Такий підхід добре працює на низьких швидкостях і простих поворотах. Але коли платформа рухається швидше або лінія має криву форму, така логіка стає не достатньо точною: рух виходить ривковим, платформа може хитатися, а іноді взагалі злітати з траєкторії.

Щоб рух був плавним, стабільним і точним, часто використовують PID-регулятор. Це спеціальний математичний алгоритм, який не просто визначає,

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

куди повертати, а ще й враховує, наскільки сильно відхилився робот від лінії і наскільки швидко це відхилення змінюється. PID — це скорочення від трьох слів: пропорційний (P), інтегральний (I) і диференціальний (D) регулятор.

Простими словами, P (пропорційна складова) — це реакція на те, наскільки далеко робот від центру лінії. Чим більше відхилення, тим сильніше потрібно повертати. I (інтегральна) частина накопичує помилки в часі: вона допомагає, якщо робот постійно трошки відхиляється вбік. D (диференціальна) частина дивиться, як швидко змінюється помилка: вона “гасить” занадто різкі повороти.

Щоб реалізувати PID в програмі, потрібно постійно обчислювати значення відхилення — “помилку”. У випадку нашого робота ця помилка визначається на основі трьох сенсорів. Наприклад:

якщо тільки лівий сенсор бачить чорне — помилка = -2;

якщо тільки правий — помилка = +2;

якщо центральний — помилка = 0;

комбінації типу “лівий + центр” дають проміжні значення: -1, +1.

Схема зображена на рис. 4.3.

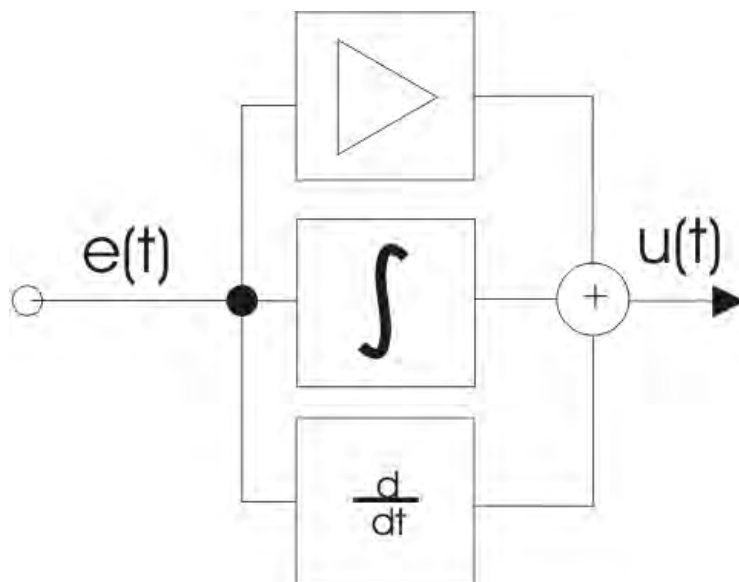


Рис. 4.3. PID - регулятор

Значення output — це те, наскільки сильно і в який бік треба коригувати рух. Його можна використати так: якщо $output > 0$, то уповільнюємо ліве колесо

(платформа повертає праворуч), якщо < 0 — уповільнюємо праве (повертає ліворуч).

Це забезпечує плавне і гнучке регулювання повороту: чим більше помилка — тим більша різниця між швидкостями коліс. На відміну від звичайної логіки if, де платформа просто “вмикає поворот”, тут вона постійно коригує свій напрямок, наче “утримується” на лінії [33].

Також важливо те, що PID-регулятор дозволяє налаштувати поведінку під різні умови — наприклад, швидкість руху, покриття, ширину лінії. Якщо зробити K_p занадто великим — будуть коливання. Якщо занадто маленьким — платформа буде “лінивою”. K_d допомагає згладити рух, K_i — компенсувати постійні зсуви.

На даному етапі в проєкті використовується проста логіка, але структура коду (особливо функція tracking() і PWM-керування) вже готова до того, щоб у будь-який момент додати PID-розрахунки. У подальшому його впровадження дозволить значно покращити якість руху — особливо якщо буде потрібно підвищити швидкість або пройти складну траєкторію з поворотами, розвилками чи перешкодами[34].

4.5. Алгоритми керування двигунами постійного струму

У мобільному роботі система приводу реалізована на основі чотирьох двигунів постійного струму типу 5840-31ZY з редуктором, кожен з яких підключений до потужного драйвера Pololu G2 High-Power Motor Driver 18v17. Цей драйвер дозволяє точно керувати як напрямом, так і швидкістю обертання моторів, що критично важливо для реалізації навігації та маневрування.

Мікроконтролер STM32F103C8T6 відповідає за формування керуючих сигналів, які передаються на входи драйвера. Для зміни напрямку обертання використовується подача логічних рівнів на два цифрові входи драйвера (DIR і PWM), а також формування широтно-імпульсного сигналу на вхід керування швидкістю. У проєкті реалізовано двоканальне керування: одна пара пінів керує

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лівими колесами, інша — правими. Таким чином, можна реалізувати як рух вперед, так і повороти на місці завдяки диференціальній логіці — коли один бік платформи обертається вперед, а інший назад. Код програми наведено в додатку А.

Керування швидкістю досягається за рахунок генерації широтно-імпульсних сигналів (ШИМ) на каналах таймера TIM2. Апаратна реалізація PWM на STM32F103C8T6 дозволяє з високою точністю задавати скважність сигналу, що визначає ефективну напругу, яка подається на двигуни, а отже — їх швидкість обертання. У коді для цього створена окрема функція `set_pwm(uint16_t ena, uint16_t enb)`, яка встановлює значення ШИМ-сигналу на каналах ENA і ENB драйвера для лівої та правої пари коліс відповідно. Функція викликає макрос `__HAL_TIM_SET_COMPARE()`, який безпосередньо змінює значення регістру порівняння таймера TIM2 — що дозволяє плавно змінювати тривалість імпульсів без зупинки системи або перезавантаження таймерів.

На основі цієї функції реалізовано набір керуючих дій: `move_forward()`, `steer_soft_left()`, `steer_soft_right()` та `stop_motors()`. Функція `move_forward()` активує обидві пари моторів у напрямку вперед, подаючи відповідні логічні рівні на пінні GPIOA: на входах напрямку для кожного драйвера (INA, INB, INC, IND) встановлюється комбінація HIGH/LOW, яка відповідає обертанню вперед. Після цього на обидва PWM-канали передається максимальна скважність `PWM_MAX`, що забезпечує повну швидкість обертання [35].

У функціях `steer_soft_left()` та `steer_soft_right()` реалізовано повороти з мінімальним радіусом: платформа обертається навколо своєї осі шляхом зміни напрямку обертання обох пар коліс на протилежні. Це досягається перестановкою логічних рівнів на відповідні порти GPIO, при цьому значення ШИМ залишається незмінним — максимальним, щоб поворот відбувався швидко. Таким чином, керування напрямком і швидкістю відокремлено на апаратному рівні, що дозволяє швидко змінювати поведінку роботи без необхідності змінювати самі сигнали ШИМ.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Функція `stop_motors()` реалізує повну зупинку приводу, встановлюючи значення ШІМ на нуль для обох каналів. Це дозволяє швидко зупинити всі мотори без зміни напрямку сигналів, що корисно для моментального гальмування в умовах втрати траєкторії або на час виконання дій маніпулятора.

Загальна архітектура програмної частини таким чином дозволяє ефективно інтегрувати керування приводом у загальну логіку навігації, забезпечуючи плавний рух, точну зупинку та можливість реалізації складніших маневрів без затримок [36].

В основному циклі роботи викликається функція `tracking()`, яка обробляє сигнали з ІЧ-датчиків лінії та повертає необхідні команди для регуляції руху. Залежно від комбінації спрацювань лівого, центрального або правого датчика, робот або підтримує прямолінійний рух, або виконує плавне коригування траєкторії. За потреби — зупиняється.

У разі впровадження PID-регулятора у майбутньому, ширина ШІМ-сигналів буде обчислюватися на основі поточної похибки положення центру лінії відносно геометричного центру робота. Це дозволить досягти більш плавного й точного слідування без ривків, особливо на поворотах або при зміні ширини лінії.

Реалізація програмного керування відокремлює напрямок обертання (через DIR-входи драйвера) від швидкості (через PWM), що дозволяє гнучко змінювати режим руху без перезапуску мікроконтролера. Зокрема, можливо підтримувати двигуни у знеструмленому стані, зберігаючи при цьому готовність до негайного старту. Функція `stop_motors()` не лише зупиняє обертання, але й утримує напрямок, що полегшує подальше керування [37].

Pololu G2 18v17 підтримує високі струми до 17 А, що дозволяє ефективно працювати навіть при збільшеному навантаженні, наприклад, при транспортуванні вантажів до 15 кг. Силове живлення драйвера подається безпосередньо від літієвого акумулятора 12 В, тоді як логічні рівні формуються на STM32 і електрично розв'язані для зменшення перешкод.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом, структура керування приводами побудована у вигляді модульних функцій, що дозволяє легко адаптувати систему до іншого типу двигунів, драйвера або розширити її, додавши нові функції — зокрема, контроль прискорення, плавне гальмування чи зміни поведінки в залежності від типу поверхні.

4.6. Алгоритми керування маніпулятором для захоплення об'єктів

У складі автономного мобільного робота реалізовано функціональну підсистему захоплення об'єктів, яка істотно розширює можливості пристрою, дозволяючи йому не лише переміщуватись у просторі, але й активно взаємодіяти з навколишнім середовищем. Центральною частиною цієї підсистеми є механічний маніпулятор типу «клешня», побудований на основі чотирьох сервомоторів SG90, які забезпечують незалежне керування кожною ступінню свободи. Один із сервоприводів відповідає за поворот основи маніпулятора в горизонтальній площині, дозволяючи орієнтувати клешню в напрямку об'єкта. Інший керує стисканням або розтисканням захоплювальних пальців, а решта два відповідають за нахил «руки» – підняття чи опускання клешні до рівня об'єкта або після захоплення.

Керування сервомоторами здійснюється з використанням широтно-імпульсної модуляції (PWM), що реалізується апаратно за допомогою таймера TIM3 мікроконтролера STM32F103C8T6. Для кожного серво виділено окремий канал: PB4, PB5, PB0 і PB1, що забезпечує точну та надійну генерацію сигналів без потреби у програмному формуванні імпульсів. Кути повороту передаються до серво через функцію `set_servo_angle()`, яка перетворює значення кута у відповідний тривалість PWM-імпульсу в межах 1–2 мс, тобто від 0° до 180°. Живлення до сервомоторів подається безпосередньо з 5-вольтової лінії живлення, і хоча стабілізатор типу AMS1117 у проєкті не використовується, живлення серво відбувається через стабільну лінію, ізольовану від логічної частини системи. Поруч із сервоприводами встановлено електролітичні

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

конденсатори великої ємності для згладжування імпульсних струмів, що виникають під час руху сервомеханізмів [38]. . Схема зображена на рис. 4.4.

Надається за запитом

Рис. 4.4. Алгоритм керування маніпулятором

У програмній логіці система керування маніпулятором інтегрована безпосередньо в основний алгоритм слідування за лінією. У функції `tracking()` аналізується стан трьох ІЧ-сенсорів, розміщених у передній частині платформи. Коли всі три датчики фіксують білу поверхню (тобто чорна лінія зникає), це означає досягнення фінішної точки маршруту, і система переходить до сценарію захоплення вантажу. Спочатку відбувається зупинка платформи, після чого подається команда на опускання клешні. Потім відбувається її розкриття, а далі система переходить у фазу сканування – поступове обертання основи маніпулятора на кути від 0° до 180° з кроком 15° . У кожному положенні виконується вимірювання відстані до об'єкта, яке в майбутньому реалізовуватиметься з використанням ультразвукового датчика HC-SR04. Якщо об'єкт зафіксовано в межах допустимої відстані, система одразу здійснює стискання клешні та підйом руки, завершуючи процедуру захоплення.

Алгоритм `find_and_pick_object()` реалізовано з урахуванням принципу поступового сканування простору, що дозволяє виявляти об'єкти навіть за невеликих помилок позиціонування платформи. Це забезпечує більшу гнучкість під час захоплення. Уся логіка дій синхронізована через затримки, що гарантує завершення кожної дії перед початком наступної. Це особливо важливо, враховуючи фізичну інерцію сервомеханізмів.

Розглядалися й альтернативні способи реалізації захоплення. Наприклад, вакуумні системи вимагають джерела розрідженого тиску, що ускладнює конструкцію та підвищує енергоспоживання. Електромагнітні захоплення ефективні лише для металевих об'єктів, а липкі гелеві або наноструктуровані захвати не забезпечують достатньої надійності при багаторазовому використанні. Також недоцільним для нашої системи виявилось використання

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пневматичних механізмів через потребу у компресорі та клапанах, що істотно збільшує габарити і ускладнює керування.

Фізичний принцип роботи сервоприводів базується на перетворенні ширини імпульсу у кут обертання. Якщо PWM має частоту 50 Гц, то імпульс тривалістю 1 мс відповідає 0°, 1.5 мс — 90°, а 2 мс — 180°. Умовно можна представити залежність кута обертання від ширини імпульсу як:

$$\theta = \left(\frac{T_{imp} - 1\text{мс}}{1\text{мс}} \right) * 180^\circ \quad (4.1)$$

де T_{imp} — ширина імпульсу у мілісекундах. Таким чином, повний контроль кута досягається шляхом простого масштабування сигналу.

Матеріалом конструкції слугує PLA-пластик, виготовлений методом FDM-друку. Внаслідок цього забезпечується поєднання малої ваги, жорсткості та достатньої міцності для утримання вантажів до 200 г. За підсумком експлуатаційних тестів, конструкція демонструє стабільність у всіх стандартних сценаріях захоплення [39].

Завдяки такій реалізації, маніпулятор у даному проєкті виконує функцію ключової точки взаємодії з навколишнім середовищем. Він повністю автоматизований, адаптований до керування з STM32 і забезпечує повний цикл: виявлення об'єкта, захоплення, транспортування і можливе розвантаження. У подальшому можливе вдосконалення за рахунок додавання енкодерів, сенсорів сили або фідбек-зв'язків, що дозволить зробити роботу маніпулятора ще більш точною, гнучкою і надійною.

4.7. Можливості подальшого розвитку

Побудована апаратна й програмна архітектура автономного мобільного робота має достатній потенціал для масштабування й функціонального розвитку. Завдяки відкритому коду, модульності прошивки та широкій підтримці мікроконтролера STM32F103C8T6, вже в базовій конфігурації пристрій виконує основні дії — навігацію, зупинку, захоплення, транспортування. Водночас

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

подальший розвиток системи може відбуватись як на рівні програмної логіки, так і на рівні обчислювальної бази [40].

Одним з найбільш перспективних напрямів є перехід до використання мікрокомп'ютера Raspberry Pi замість мікроконтролера STM32. Такий крок дозволяє значно розширити обчислювальні можливості робота, оскільки Raspberry Pi підтримує багатозадачність, має повноцінну файлову систему, велику оперативну пам'ять та можливість запуску складних програмних модулів, зокрема на мовах Python або C++. Платформа також підтримує підключення камери, USB-периферії, бездротових інтерфейсів (Wi-Fi, Bluetooth) та зовнішніх сенсорів через I2C, UART, SPI, що спрощує модернізацію.

Наявність операційної системи (наприклад, Raspberry Pi OS або Ubuntu Core) відкриває шлях до впровадження алгоритмів комп'ютерного зору та елементів штучного інтелекту (AI). Наприклад, використовуючи бібліотеки OpenCV або TensorFlow Lite, можна реалізувати виявлення об'єктів на відео з камери, розпізнавання кольору, контурів, QR-кодів або навіть людей. Це дозволить значно підвищити гнучкість платформи: не лише рухатись по статичній лінії, а й реагувати на зображення, маркери або складну сцену в реальному часі. Приклад показано на рис. 4.5.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

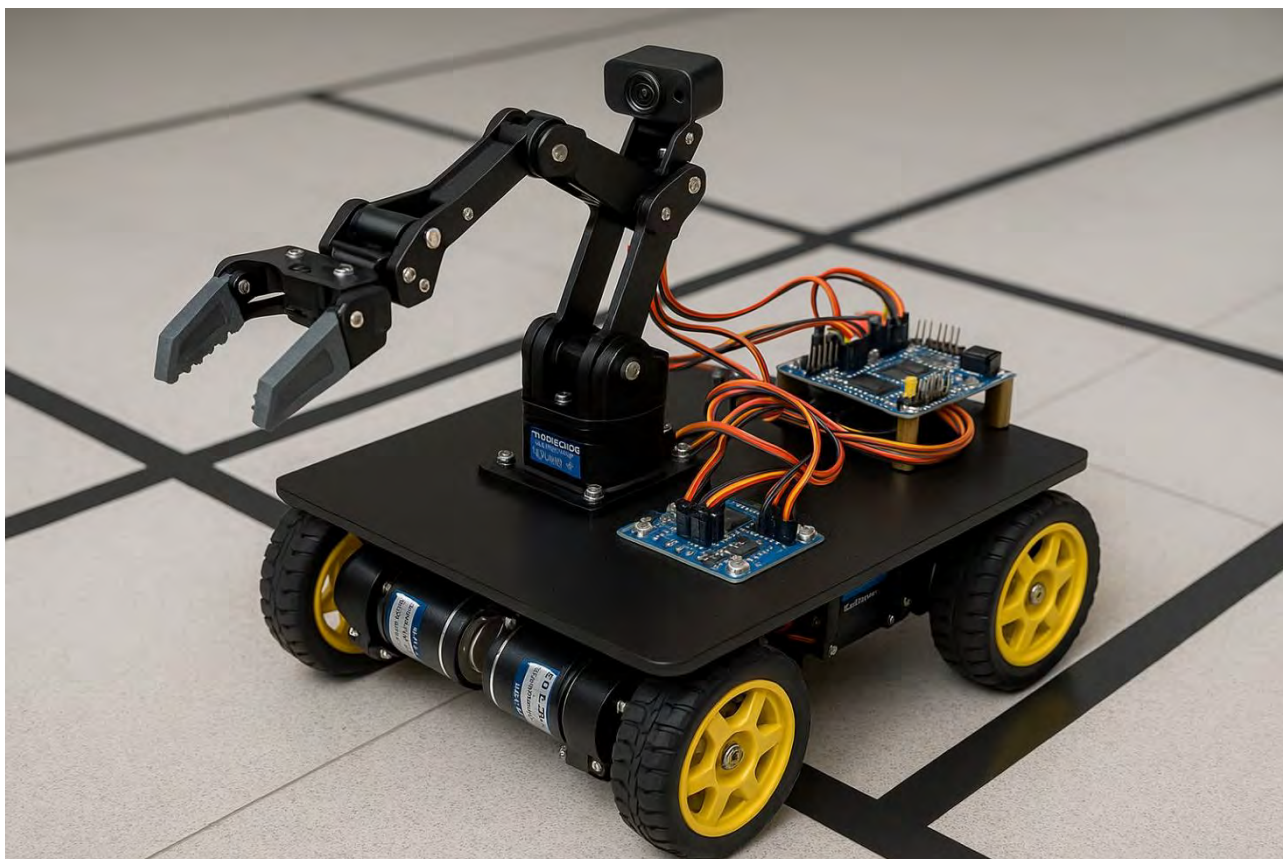


Рис. 4.5. Візуалізація прототипу версії мобільного робота з використанням Raspberry Pi та систем комп'ютерного зору.

Іншим напрямом розвитку є реалізація інтелектуальної поведінки на основі моделей машинного навчання. Наприклад, мережа, навчена на типових сценаріях розташування об'єктів, може передбачати оптимальну послідовність дій маніпулятора або будувати маршрути уникнення перешкод. З урахуванням підключення камери, LIDAR чи ToF-сенсора, можлива інтеграція з алгоритмами SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), які дозволяють роботу автономно орієнтуватися у приміщенні без попереднього маркування поверхні.

Сценарій використання AI може включати і побудову поведінкової логіки з адаптацією: наприклад, при надмірному навантаженні або зміні траєкторії система може автоматично перебудовувати свій маршрут або регулювати швидкість захоплення. Також AI дозволяє реалізувати функції голосового управління або взаємодії з користувачем через розпізнавання мови.

На базі Raspberry Pi значно простіше впровадити віддалений контроль і моніторинг, наприклад, через браузер, мобільний застосунок або хмарну

платформу. Робот може надсилати телеметрію, відео з камери, сигнали про збої, приймати завдання на виконання маршруту або завантаження об'єкта з мобільного інтерфейсу.

Таким чином, перехід до Raspberry Pi не лише розширює обчислювальні можливості, а й дає змогу перевести пристрій на якісно новий рівень автономності. У поєднанні з використанням AI, комп'ютерного зору та інтернет-підключення, розроблений робот може стати основою для багатофункціонального навчального, дослідницького або промислового мобільного рішення, здатного адаптуватися до складних завдань без повної реконструкції апаратної частини.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі розглянуто побудову програмного забезпечення автономного мобільного робота, включаючи структуру коду, обробку сенсорних даних, керування двигунами та маніпулятором. Реалізовано алгоритм слідування за лінією, а також основи PID-регулятора для точнішого коригування траєкторії.

Керування приводом здійснюється через апаратні ШІМ-канали, а робота маніпулятора синхронізується з логікою руху. Програмна частина повністю відповідає поставленим вимогам, є надійною та готовою до розширення функціоналу у майбутньому.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи «Автономний мобільний робот для транспортування вантажів» було спроектовано та виготовлено шасі мобільної платформи, розраховане на перевезення вантажів масою до 15 кг. Для забезпечення необхідної міцності та стійкості провели 3D-моделювання конструкції в середовищі SolidWorks, врахувавши геометричні параметри профілів та вибір алюмінієвих сплавів із оптимальним співвідношенням жорсткості і маси. Статичний аналіз напружень і деформацій підтвердив відповідність конструкції вимогам до експлуатації на різних типах поверхонь без втрати несучої здатності.

Механізм захвату було суттєво вдосконалено: створено каркасну клешню з трьома серводвигунами Hiwonder HTD-30H, що забезпечують точне позиціонування та зворотний зв'язок. Оптимізована кінематика дозволяє надійно утримувати вантажі розміром до 15×15×15 см, а розташування сервоприводів і зміцнені торсіонні пари гарантують стійкість захвату навіть при динамічних маневрах.

Програмне забезпечення для мікроконтролера STM32F103C8T6 включає повний набір модулів обробки даних із ІЧ-датчика лінії KS0453 та ультразвукового сенсора HC-SR04. Розроблено алгоритм слідування за контрастною траєкторією з використанням пропорційного регулятора та табличного визначення PWM-коефіцієнтів, а також алгоритм об'їзду перешкод із поверненням на початкову лінію. Додатково реалізовано управління клешнею через серійний інтерфейс та обробку команд з ІЧ-пульта HX1838 за допомогою переривань EXTI.

Електрична частина системи представлена принциповою схемою, у якій усі датчики, приводи та засоби відладки (UART на PA9–PA10) інтегровані з контролером STM32. Живлення 12 В від акумулятора стабілізоване через DC–DC конвертор LM2596 з LC-фільтром для отримання 3.3 В, що гарантує низький рівень пульсацій та надійність роботи чутливих компонентів.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

На завершальному етапі оформлено структурну й функціональну схеми системи. Структурна схема демонструє взаємодію блоків сенсорів, керування, приводів та живлення, а функціональна діаграма відображає послідовність ініціалізації, зчитування сигналів, ухвалення рішень щодо руху та виконання циклу доставки. Завдяки комплексному підходу — від механічного проєктування й розробки електроніки до написання програмного коду — створено готовий до тестування автономний мобільний робот, здатний ефективно транспортувати вантажі в реальних умовах.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Siciliano B., Khatib O. (Eds.). Springer Handbook of Robotics. Cham: Springer, 2016. – 2120 с.
2. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. London; New York: Springer, 2009. – 737 с.
3. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB, 3rd ed. Cham: Springer, 2021. – 592 с.
4. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots, 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2011. – 612 с.
5. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. Cambridge, MA: MIT Press, 2005. – 350 с.
6. LaValle S. M. Planning Algorithms. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 651 с. – URL: <http://planning.cs.uiuc.edu/> (дата звернення: 30.05.2025).
7. Arkin R. C. Behavior-Based Robotics. Cambridge, MA: MIT Press, 1998. – 232 с.
8. Skoczeń J., Wiśniewski R., Bartoszewicz A. Mobile Robot Navigation Tutorial, 2nd ed. Warsaw: Faculty of Mechatronics, Warsaw University of Technology, 2015. – 286 с. – URL: <https://www.mechatronics.edu.pl/nawigacja> (дата звернення: 30.05.2025).
9. Corke P., Choudhary S., Pingali G. Learning ROS for Robotics Programming, 2nd ed. Birmingham: Packt Publishing, 2020. – 480 с.
10. Thrun S., Burghardt L. SLAM for Dummies: A Practical Guide. In: Advances in Neural Information Processing Systems, NIPS 2016. – С. 5645–5655.
11. Fox D., Burgard W., Thrun S. Probabilistic Localization. In: Sebrechts M. (Ed.). Mobile Robot Programming Toolkit (MRPT). Cham: Springer, 2015. – С. 45–68.
12. Kaneko M., Kanehiro F., Morisawa M., Ushizima H. Humanoid Robotics: A Reference. Berlin: Springer, 2016. – 1024 с.
13. Borenstein J., Everett H. R., Feng L. Navigating Mobile Robots: Systems and Techniques. Wellesley, MA: A K Peters, 1996. – 272 с.

- 14.Arkin R. C., Donald B. R., Jennings J. H. “A Behavior-Based Architecture for Mobile Robots.” In: The International Journal of Robotics Research, 1992. – Vol. 11, № 6, С. 345–364. DOI: 10.1177/027836499201100602.
- 15.LaValle S. M., Kuffner J. J. “Randomized Kinodynamic Planning.” In: The International Journal of Robotics Research, 2001. – Vol. 20, № 5, С. 378–400. DOI: 10.1177/02783640122067453.
- 16.Thrun S. Learning to Drive: From Simulation to Reality. In: Advances in Neural Information Processing Systems, NIPS 2016. – С. 5645–5655.
- 17.Погребняк С. Г., Погребняк О. С. Автономні мобільні роботи: навч. посіб. – Харків: Харківська політехніка, 2019. – 376 с.
- 18.Бондаренко В. В., Слюсаренко Є. О., Клименко О. М. Методи побудови карти та локалізації в мобільних роботах. – Львів: Інженерний вісник, 2020. – 312 с.
- 19.Кочубей О. І., Шевченко М. І. Робототехніка: підруч. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 592 с.
- 20.Коваленко І. В., Терещенко О. Ю. Сенсорні системи для керування роботами. – Одеса: ОНУ, 2019. – 248 с.
- 21.Гошовський О. М. Мобільні платформи: механіка та керування. – Дніпро: Дніпровська політехніка, 2017. – 284 с.
- 22.Баулін С. П., Чирко П. І. Комп’ютерне бачення в робототехніці. – Київ: Наукова думка, 2021. – 336 с.
- 23.Momot A., Galagan R., Gluhovskii V. Deep Learning Automated System for Thermal Defectometry of Multilayer Materials. // Devices and Methods of Measurements. – 2021. – № 12. – С. 98–107. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-98-107.
- 24.Котляр О. В., Гусар В. С. Програмування ROS: практичний курс. – Львів: КНТ, 2020. – 272 с.
- 25.Капустін О. А. Навігація мобільних роботів у закритих приміщеннях. – Харків: Фоліо, 2018. – 224 с.

- 26.Багдан О. М. Моделювання та керування мобільними роботами. – Київ: Інститут проблем моделювання, 2019. – 304 с.
- 27.Корнієнко В. П. Класифікація автономних мобільних роботів. – Київ: Наукова думка, 2018. – 256 с.
- 28.Турченко Л. Є., Іванова Т. С. Привідні системи та енергоживлення роботів. – Львів: Видавництво “Лев”, 2017. – 312 с.
- 29.Momot A., Zaboluiieva M., Galagan R. Automated segmentation of ultrasound medical images using the Attention U-Net model. // Norwegian Journal for Development of the International Science. – 2024. – № 128. – С. 56–60. DOI: 10.5281/zenodo.10817342.
- 30.Поліщук С. В. Усилювачі та драйвери для приводів DC-моторів. – Дніпро: Техніка, 2020. – 280 с.
- 31.Демченко І. І., Журавльов М. М. Серводвигуни та їхнє управління. – Харків: Політехніка, 2019. – 240 с.
- 32.Skladchykov I. O., Momot A., Galagan R., Bohdan G. A., Trotsiuk K. M. Application of YOLOX deep learning model for automated object detection on thermograms. // Information Extraction and Processing. – 2022. – № 50. – С. 69–77. DOI: 10.15407/vidbir2022.50.069.
- 33.Гриненко П. Р., Дмитрієв В. О. Автоматизація маніпуляторів: методи та алгоритми. – Київ: Освіта, 2021. – 360 с.
- 34.Зубко О. В., Морозова Г. Л. Інтеграція AI у мобільні платформи. – Київ: Видавництво КНТ, 2022. – 328 с.
- 35.Кочерга А. Б., Моцак О. Р. Імпульсні DC-DC перетворювачі в робототехніці. – Харків: Політехніка, 2019. – 208 с.
- 36.Муравйов О. В., Довбиш І. О., Галаган Р. М., Богдан Г. А., Момот А. С. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА. // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – Т. 34 (73), № 2. – С. 199–205. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.1/32.
- 37.Савельєв В. І., Петрова О. А. Ультразвукові та ToF-датчики у роботах. – Дніпро: Дніпровська політехніка, 2021. – 264 с.

					<i>ДПБ.ПК-11.10.1760.00.000.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

38. Steshenko Y. V., Momot A. S., Protasov A. G., Muraviov O. V. Automation of the process of segmentation of images of metal surface defects using the neural network U-Net. // Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. – 2023. – № 2. – С. 34–40. DOI: 10.37434/tdnk2023.02.05.
39. Міщенко С. П., Черненко А. В. PID-регулятори для систем керування роботів. – Київ: Наукова думка, 2018. – 252 с.
40. Momot A., Kretsul V., Muraviov O., Galagan R. Automated defect detection in printed circuit boards based on the YOLOv5 neural network. // The Paton Welding Journal. – 2024. – № 4. – С. 46–52. DOI: 10.37434/tpwj2024.04.07.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. 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.