

**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

АСНК Галина БОГДАН

«__»_____20__ 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: «Мобільний робот для автоматизації складських операцій»

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ПМ-11

Привалов Олександр Володимирович

Керівник:

доцент каф. АСНК, к.т.н.

Нечай Сергій Олексійович

Рецензент:

асистент каф. КІТВП

Заєць Сергій Сергійович

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Пояснювальна записка	71	
3	A1	ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.СК	Складальний кресленик	1	
4	A2	ДПБ.ПМ-11.17.1760.01.001.	Корпус	1	
5	A3	ДПБ.ПМ-11.17.1760.01.002.	Платформа	1	
6	A3	ДПБ.ПМ-11.17.1760.01.003.	Колесо	1	
7	A2	ДПБ.ПМ-11.17.1760.02.000.СхС	Схема структурна	1	
8	A2	ДПБ.ПМ-11.17.1760.03.000.СхФ	Схема функціональна	1	
9	A1	ДПБ.ПМ-11.17.1760.04.000.	Результати моделювання	1	

				ДПБ.ПМ-11.17.1760.01.000.ПЗ		
	ПБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Привалов О.В.				1	1
Керівн.	Нечай С.О.				КП ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-11	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.						

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Мобільний робот для автоматизації складських
операцій»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

АСНК Галина БОГДАН

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Привалову Олександрову Володимировичу

1. Тема проєкту «Мобільний робот для автоматизації складських операцій», керівник проєкту Нечай Сергій Олексійович, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1765-с
2. Термін подання студентом проєкту 4 червня 2025 року
3. Вихідні дані до проєкту: маса вантажу до 200 кг; габаритні розміри посилки до 90 см х 70 см х 80 см; максимальна маса робота з вантажем 280 кг; енергоємність батареї 463 Вт·год; середня потужність, яку споживає робот, 152 Вт; час роботи на одному заряді акумулятора 3 години.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Огляд існуючих аналогів та технологій для автоматизації складських операцій за допомогою мобільних роботів. Система керування мобільним роботом для виконання складських операцій. Математичне моделювання мобільного робота та процесів складських

операцій. Моделювання, розрахунків та вибір компонентів роботи для автоматизації складських операцій. Список використаних джерел. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 5.1. Система керування мобільним роботом для складу. Структурна схема. 1 арк. ф. А2. 5.2. Система керування мобільним роботом для складу. Функціональна схема. 1 арк. ф. А2. 5.3. Система керування мобільним роботом для складу. Складальне креслення. 1 арк. ф. А1. 5.4. Робочі креслення деталей. 1 арк. ф. А1. 5.5. Система керування мобільним роботом для складу. Моделювання процесу навантаження робота. 1 арк. ф. А1. 5.6. Графічні матеріали. 1 арк. ф. А1.

6. Дата видачі завдання 23 березня 2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Ознайомлення з завданням дипломного проєкту та постановка задач	До 20.04.2025	
2	Огляд літературних джерел та аналіз існуючих аналогів	До 29.04.2025	
3	Розробка схеми системи та опис її елементів	До 06.05.2025	
4	Розробка математичної моделі системи	До 18.05.2025	
5	Моделювання роботи системи	До 25.05.2025	
6	Оформлення пояснювальної записки	До 04.06.2025	
7	Оформлення графічних матеріалів	До 08.06.2025	

Студент

Олександр ПРИВАЛОВ

Керівник

Сергій НЕЧАЙ

АНОТАЦІЯ

Дана бакалаврська робота зосереджена на створенні системи керування для мобільного робота, який здатен автоматизувати операції на сучасному складі. Розвиток таких автономних систем є важливим напрямком у сучасних технологіях. Робота починається з аналізу вже існуючих рішень у сфері керування складськими мобільними роботами. Ми розглядаємо актуальні підходи до їхньої самостійної навігації, проводимо порівняння пропозицій від різних виробників та на цій основі формулюємо ключові вимоги до подібних роботизованих систем.

Наступним етапом є розробка власної схеми системи керування. Ми представляємо її структурну організацію, даємо опис головних складових частин та показуємо, як вони взаємодіють між собою на функціональному рівні. Після цього переходимо до побудови математичного апарату. Сюди входять кінематична модель, що описує геометрію руху робота, та динамічна модель, яка враховує вплив вантажу. Також розробляються моделі для системи навігації та визначення точного положення робота на території складу, і для системи, що відповідає за виявлення та безпечний об'їзд перешкод.

Практична частина роботи включає моделювання та інженерні розрахунки. Ми проводимо аналіз міцності конструкції робота під дією експлуатаційних навантажень. Здійснюємо розрахунки для вибору оптимальних електродвигунів, що забезпечать рух платформи. Також розраховуємо необхідне енергоспоживання та підбираємо відповідні акумуляторні батареї. Завершується цей розділ симуляцією виконання роботом типових завдань у віртуальному складському середовищі, що дозволяє оцінити працездатність розроблених алгоритмів.

У заключній частині роботи підбиваються підсумки проведеного дослідження та наводяться основні висновки. Також формулюються рекомендації щодо можливих напрямків для подальшого вдосконалення та

розвитку запропонованої системи. Для підтвердження отриманих результатів надається список використаних літературних джерел та необхідні додатки.

Виконана робота має практичне значення для подальшого розвитку автономних систем, призначених для автоматизації складських процесів. Вона сприяє вирішенню актуальних завдань підвищення ефективності та безпеки у сфері внутрішньоскладської логістики.

Ключові слова: Мобільний робот, автоматизація складу, система керування, автономна навігація, складська логістика.

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the creation of a control system for a mobile robot capable of automating operations in a modern warehouse. The development of such autonomous systems is an important direction in modern technology. The work begins with an analysis of existing existing solutions in the field of warehouse mobile robot control. We consider current approaches to their autonomous navigation, compare offers from different manufacturers and, on this basis, formulate key requirements for such robotic systems.

The next stage is developing our own control system diagram. We present its structural organisation, describe its main components, and show how they interact with each other at the functional level. After that, we move on to building the mathematical apparatus. This includes a kinematic model that describes the geometry of the robot's movement, and a dynamic model that takes into account the influence of the load. We also develop models for the navigation system and for determining the exact position of the robot in the warehouse, as well as for the system responsible for detecting and safely avoiding obstacles.

The practical part of the work includes modelling and engineering calculations. We analyse the strength of the robot's structure under operational loads. We perform calculations to select the optimal electric motors that will ensure the movement of the platform. We also calculate the required energy consumption and select the appropriate batteries. This section concludes with a simulation of the robot performing typical tasks in a virtual warehouse environment, which allows us to evaluate the performance of the developed algorithms.

In the final part of the work, the results of the study are summarised and the main conclusions are presented. Recommendations are also formulated regarding possible directions for further improvement and development of the proposed system. To confirm the results obtained, a list of references and necessary appendices are provided. The work performed has practical significance for the further development of

autonomous systems designed to automate warehouse processes. It contributes to solving urgent tasks increasing efficiency and safety in the field of intralogistics.

Keywords: Mobile robot, warehouse automation, control system, autonomous navigation, warehouse logistics.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- AGV – Automated Guided Vehicle (Автоматизований керований візок)
- AMR – Autonomous Mobile Robot (Автономний мобільний робот)
- BMS – Battery Management System (Система управління батареєю)
- CAD – Computer-Aided Design (Система автоматизованого проектування)
- DWA – Dynamic Window Approach (Метод динамічного вікна)
- FMS – Fleet Management System (Система управління парком (роботів))
- GTP – Goods-to-Person (Система "товар-до-людини")
- GUI – Graphical User Interface (Графічний інтерфейс користувача)
- IMU – Inertial Measurement Unit (Інерційний вимірювальний блок)
- LiDAR – Light Detection and Ranging (Лазерний далекомір / Лазерне виявлення та визначення відстані)
- MES – Manufacturing Execution System (Система управління виробництвом)
- MQTT – Message Queuing Telemetry Transport (Протокол передачі повідомлень телеметрії)
- ROS – Robot Operating System (Операційна система для роботів)
- RPM – Revolutions Per Minute (Оберти за хвилину)
- SLAM – Simultaneous Localization and Mapping (Одночасна локалізація та картографування)
- VFH – Vector Field Histogram (Гістограма векторного поля)
- WMS – Warehouse Management System (Система управління складом)

ЗМІСТ

ВСТУП	11
1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ.....	13
1.1 Технології автономної навігації та методи планування маршрутів для мобільних роботів на складі.....	13
1.2 Автономні мобільні роботи (AMR) для транспортування вантажів.....	15
1.3 Автоматизовані керовані візки (AGV) для руху за визначеними маршрутами.....	17
1.4 Роботизовані системи "товар-до-людини" (Goods-to-Person, GTP).....	19
1.5 Порівняльний аналіз існуючих рішень для автоматизації різних складських операцій.....	22
1.6 Формулювання вимог до системи керування мобільного робота для автоматизації визначених складських операцій.....	26
Висновки до розділу 1.....	29
2. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ ДЛЯ ВИКОНАННЯ СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ: СХЕМА ТА КОМПОНЕНТИ.....	30
2.1. Блок керування рухом та точним позиціонуванням робота для виконання операцій.....	30
2.2. Навігація та локалізація робота в зонах виконання складських операцій...	31
2.3. Сенсори для орієнтації, безпеки та контролю виконання операцій.....	34
2.4. Зв'язок робота з системами управління складом для координації операцій	36
2.5. Механізми для виконання складських операцій та їх керування.....	38
2.6. Система живлення та забезпечення безперервності виконання операцій...	41
Висновки до розділу 2.....	42

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Привалов О.В.			Мобільний робот для автоматизації складських операцій				Літ.		Арк.	Акруїїв	
Перевір.		Нечай С.О.									9	71	
									НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»				
Н. Контр.													
Затверд.		Нечай С.О.											

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА ТА ПРОЦЕСІВ СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ.....	43
3.1. Кінематична модель руху складського робота.....	43
3.2. Динамічна модель руху робота під час виконання операцій з вантажем...	45
3.3. Модель системи навігації та визначення положення для точного виконання операцій.....	47
3.4. Модель виявлення та об'їзду перешкод в динамічному складському середовищі.....	49
3.5. Модель обробки сигналів та прийняття рішень для керування операціями.....	52
3.6. Модель роботи механізмів, задіяних у складських операціях.....	55
Висновки до розділу 3.....	57
4. МОДЕЛЮВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР КОМПОНЕНТІВ РОБОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ.....	59
4.1. Технічні вимоги та вихідні дані для розробки робота під конкретні складські операції.....	59
4.2. Моделювання навантажень на конструкцію робота під час виконання операцій.....	60
4.3. Розрахунок та вибір електродвигунів для руху та приводів операційних механізмів.....	65
4.4. Розрахунок енергоспоживання та вибір акумуляторів для тривалого виконання операцій.....	66
4.5. Симуляція виконання роботом типових складських операцій.....	68
Висновки до розділу 4.....	70
ВИСНОВКИ.....	71
Список джерел.....	73

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Привалов О.В.			Мобільний робот для автоматизації складських операцій		
Перевір.		Нечай С.О.					
Н. Контр.							
Затверд.		Нечай С.О.					
						Лім.	Арк.
							10
						Акрушів	
						71	
						НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»	

ВСТУП

Стрімкий технологічний прогрес невинно трансформує наше повсякдення та підходи до ведення бізнесу. Одним із яскравих проявів цих змін є активне впровадження мобільних роботів, здатних автономно виконувати різноманітні завдання. У сфері логістики та управління запасами такі роботизовані системи відкривають нові можливості для підвищення ефективності, швидкості та безпеки внутрішньоскладських операцій. Застосування мобільних роботів на складах стає дедалі актуальнішим на тлі зростаючої потреби в автоматизації рутинних процесів, оптимізації витрат та покращенні якості обробки товарів. Сучасні тенденції, такі як ріст електронної комерції та ускладнення ланцюгів постачання, висувають нові, більш жорсткі вимоги до швидкості та точності роботи складів. Автономні мобільні роботи є перспективним інструментом для вирішення цих завдань, адже вони здатні працювати з високою інтенсивністю, не потребують перерв та можуть забезпечити швидке і безпечне переміщення вантажів у динамічному та часто обмеженому просторі складських приміщень.

Розробка системи керування для такого мобільного складського робота є комплексним інженерним завданням. Воно охоплює забезпечення автономної навігації в приміщенні, точну локалізацію робота, ефективне уникнення статичних та динамічних перешкод, раціональне використання енергетичних ресурсів та налагодження надійного обміну даними в режимі реального часу. Успішна реалізація подібних систем вимагає інтеграції знань з робототехніки, теорії автоматичного керування, комп'ютерного зору, методів штучного інтелекту та телекомунікаційних технологій. Ключовим аспектом є автономна навігація, оскільки робот повинен вміти самостійно орієнтуватися у структурованому, але часто змінному середовищі складу. Це, в свою чергу, потребує застосування сучасних алгоритмів для побудови або використання карт приміщень та ефективного планування маршрутів. Точна локалізація

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє роботу постійно знати своє місцезнаходження, що є запорукою точності виконання маневрів та мінімізації ризику зіткнень.

Метою даної дипломної роботи є розробка та дослідження системи керування для мобільного робота, призначеного для автоматизації операцій транспортування вантажів у межах складського приміщення, з акцентом на забезпечення високого рівня безпеки та ефективності. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання: проводиться детальний аналіз існуючих рішень у сфері автоматизації складів за допомогою мобільних роботів; розробляються структурна та функціональна схеми пропонованої системи керування; створюється комплекс математичних моделей, що описують кінематику, динаміку та ключові аспекти поведінки робота; виконується моделювання роботи системи та розрахунок основних параметрів. Аналіз існуючих рішень включає огляд сучасних технологій навігації в приміщеннях, порівняння систем керування від різних виробників та визначення основних технічних вимог до проектованої системи.

Очікується, що результати цієї роботи сприятимуть подальшому розвитку технологій автономних мобільних систем для складської логістики, зокрема, можуть бути корисними при проектуванні та впровадженні подібних роботів у реальні виробничі процеси. Це підвищення продуктивності праці, оптимізації використання складських площ та покращення загальної ефективності логістичних операцій. Крім того, автоматизація за допомогою мобільних роботів може сприяти зменшенню операційних витрат та покращенню умов праці персоналу. Успішна реалізація системи керування для мобільного складського робота вимагає комплексного підходу та інтеграції різних технологій, що підкреслює актуальність та практичну значущість даного дослідження для подальших розробок у галузі робототехніки та автоматизації.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

1.1 Технології автономної навігації та методи планування маршрутів для мобільних роботів на складі

Аби складський робот не просто катався туди-сюди, а справді приносив користь, йому потрібна своя «голова на плечах» – система, що дозволяє орієнтуватися в просторі самостійно. Саме вона допомагає йому зрозуміти, де він зараз, куди треба прямувати, як не врізатися в людей чи інші машини, і як акуратно виконати свою роботу – чи то перевезти коробку, чи поставити її на полицю. Сучасні склади – це місця досить метушливі, хоч і з певним порядком, тому робот має бути дуже точним і обережним. Для цього інженери винайшли чимало різних технологій та хитрих програм, і кожна з них має свої сильні та слабкі сторони, коли йдеться про роботу на складі [5].

Давайте розберемося з основними:

- SLAM (Simultaneous Localization and Mapping): Це система, що дозволяє роботу одночасно малювати карту складу й розуміти, де він сам на цій карті знаходиться. Уявіть: робот вперше заїжджає у невідоме приміщення. SLAM допомагає йому, створити план – де стелажі, де проходи, де зони для роботи – і при цьому не загубитися. Це дуже важливо, бо обстановка на складі може змінюватися, або робот може починати роботу щоразу з іншого кутка. Щоб сканувати навколишній світ, складські роботи зі SLAM часто використовують лазери (2D або 3D LiDAR, схожі на ті, що в автопілотах машин), камери (іноді такі, що вміють визначати відстань до предметів, як RGB-D) та спеціальні датчики руху (IMU, схожі на ті, що в наших смартфонах, але набагато точніші). Без чіткої карти та розуміння, де він, робот просто не зможе безпечно маневрувати вузькими коридорами чи акуратно під'їжджати до потрібного стелажа. [16]

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- *Їзда по готових маршрутах або підказками на підлозі:* Не завжди роботам потрібно мати такі дорогі та серйозні технології як SLAM. Іноді вони можуть просто їхати за заздалегідь прокладеними шляхами або орієнтуватися за спеціальними вказівками на підлозі.
 - Лінії на підлозі : Робот просто «бачить» лінію і їде вздовж неї. Це стара, перевірена роками технологія, яку часто використовують так звані AGV (автоматизовані керовані візки). Зазвичай ці лінії магітні або намальовані фарбою [14].
 - QR-коди або інші мітки: Робот своєю камерою зчитує спеціальні коди, розміщені на підлозі чи стінах. За ними він розуміє, де знаходиться, або отримує команду, куди рухатися далі.
 - Рух по вже готовій карті: Якщо план складу вже є (наприклад, його створили раніше за допомогою того ж SLAM), робот може просто рухатися за допомогою віртуальної карти за заданим маршрутом [20].

Такі методи добре підходять для стандартних, однотипних завдань. Але якщо на складі щось зміниться – наприклад, пересунуть стелажі – то роботам, що орієнтуються по лініях, доведеться важко. Сучасніші AMR (автономні мобільні роботи), які часто покладаються на SLAM, у таких ситуаціях значно гнучкіші [13].
- *Навігація за базовими патернами поведінки:* Це навігація, що спирається на поведінкові моделі. Це означає, що робот має набір простих інструкцій, як діяти в тій чи іншій ситуації. Скажімо, для складського робота це може бути: якщо він бачить людину, то робот повинен зупинитись або об'їхати її, або коли потрібно підїхати до конвеєра то потрібно знизити швидкість і зробити це як найобережніше. Такий підхід дозволяє роботу краще пристосовуватися до того, що відбувається навколо нього в реальному часі [18].

- *За допомогою машинного навчання:* Без машинного навчання зараз нікуди, і складські роботи – не виняток. Воно допомагає їм не просто сканувати камерами простір, а й справді розуміти, що відбувається на складі. Наприклад, за допомогою нейронних мереж, роботи можуть навчитися розпізнавати різні типи коробок, знаходити вільні місця на полицях або навіть намагатися вгадати, куди зараз піде людина чи поїде навантажувач. Це все потрібно, щоб робот міг планувати свої маршрути безпечніше та розумніше [12].
- *Керування головним комп'ютером:* Завдяки системам WMS (система управління складом) або MES (система управління виробництвом) можна значно сильно підвищити ККД роботи роботів між собою. Саме звідти він отримує завдання що взяти і куди відвезти і туди ж звітує про виконану роботу. Тільки так можна по-справжньому налагодити автоматичну роботу всього складу [10].

1.2 Автономні мобільні роботи (AMR) для гнучкого транспортування вантажів

Якщо раніше автоматизація складу часто асоціювалася з громіздкими конвеєрами або візками, що суворо їздять по рейках, то зараз використовують – автономні мобільні роботи, або скорочено AMR. Це не просто роботи для складу, що рухаються по намальованій лінії. AMR – це куди розумніші пристрої, які вміють самі розбиратися, де вони, об'їжджати раптові перешкоди і легко змінювати свої шляхи. Саме ця гнучкість і робить їх такими цінними для сучасних складів, де все може швидко змінюватися [6].

Чим самі особливі ці AMR? Найбільша їх перевага – у їхній самостійності. Замість того, щоб слідувати за проводами під підлогою чи магнітними стрічками, як їхні старші брати AGV, ці роботи використовують більш просунуті технології. Дуже часто це той самий SLAM, про який ми вже говорили.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За допомогою LiDAR та камер вони або створюють карту складу просто під час руху, або користуються вже готовою, постійно перевіряючи, чи не збилися з курсу.

Це дозволяє їм не просто їхати з пункту А в пункт Б, а й розуміти, що коїться навколо. Якщо на дорозі раптом опинилася коробка, яку хтось забув, або йде людина, AMR не зупиниться, а спробує знайти інший шлях [4].



Рис.1.1 – Робот Rozitek

Саме ця гнучкість робить AMR такими зручними для впровадження. Не потрібно перевстановлювати магнітні стрічки або QR-коди, роботу достатньо буде об'їздити оновленню перестановку складу і він готовий до роботи, далі він буде автоматично сам все виконувати з найменшим ризиком для непервності автоматизації.

В основному AMR займаються таким видом перевозок:

- *Маленькі контейнери, ящики чи лотки:* Робот може під'їхати, оператор покладе на нього вантаж, і він відвезе його в інший кінець складу.
- *Візки або цілі полиці:* Деякі моделі AMR вміють підчепитися під спеціальні візки або мобільні стелажі і тягнути їх за собою. Це дуже

зручно, наприклад, щоб доставляти деталі на складальну лінію або перевозити вже зібрані замовлення.

- *Допомога людям:* AMR часто працюють поруч з людьми, беручи на себе нудну роботу з перетягування вантажів. Це звільняє час працівників для більш складних завдань, де потрібне людське втручання.

Якщо брати ринок AMR роботів то можемо розглянути такі вдалі моделі. Наприклад, компанія MiR (Mobile Industrial Robots) – їхні роботи славляться тим, що ними легко керувати і вони дуже гнучкі. Також популярні машини від Fetch Robotics (яка тепер частина Zebra Technologies) – вони пропонують цілі системи для автоматизації, включаючи роботів і для перевезення, і для збирання замовлень. А от компанія Otto Motors (це підрозділ Clearpath Robotics) робить більш потужні AMR для промисловості, які можуть тягати важчі вантажі [13].

Звичайно, не все так безхмарно, і AMR – це не ідеальний без недоліків варіант. Вони можуть коштувати суттєво дорожче, ніж простіші AGV. Для їхньої стабільної роботи потрібен хороший Wi-Fi по всьому складу, щоб вони мали підключення з WMS. І хоча вони вміють об'їжджати перешкоди, якщо на складі справжній хаос і дуже багато людей та техніки, то й вони можуть почати дуже забагато гальмувати і бути в простої.

Та все ж, їхня гнучкість, відносна легкість впровадження в роботу та вміння пристосовуватися до мінливих умов роблять автономних мобільних роботів дедалі популярнішим вибором для тих, хто хоче автоматизувати перевезення вантажів на сучасному складі.

1.3. Автоматизовані керовані візки (AGV) для руху за визначеними маршрутами

Автономні мобільні роботи (AMR) здатні адаптуватися до середовища без необхідності зовнішньої інфраструктури, тоді як AGV опираються на фіксовані траєкторії руху та потребують спеціального маркування шляху [14].

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як правило, AGV орієнтуються на дорозі завдяки спеціальним підказкам, вбудованим прямо в підлогу чи оточення складу. Ось найпопулярніші варіанти: *Магнітні стрічки чи дроти*: Під покриттям підлоги або просто зверху наклеєна магнітна стрічка, або ж прокладений спеціальний дріт. AGV має датчики, які за допомогою магнітного поля ведуть візок точно по лінії. Це, мабуть, один з найпоширеніших і найнадійніших способів навігації для них.

Намальовані лінії: Тут все простіше – на підлогу наносять яскраву лінію фарбою. Робот за допомогою оптичних сенсорів помічає цю лінію і тримається її. Дешевше за магнітний аналог, але якщо лінія забрудниться чи зітреться – робот може й перестати їздити по запланованому маршруту.

Лазери та відбивачі: У цьому випадку AGV теж використовує лазер, але не для того, щоб самому сканувати і спроектувати карту, як це роблять деякі AMR. Замість цього, по кутках робочої зони розвішують спеціальні світловідбиваючі мітки. Робот постійно користується лазером для того щоб виміряти відстані та кути і завдяки цьому розуміє, де він знаходиться в просторі відносно заздалегідь прописаного маршруту.



Рис.1.2 – Робот Götting KG

Оскільки AGV – зазвичай їздят лише по визначених маршрутах, їх дуже вигідно і зручно ставити на ті ділянки роботи, де все повторюється кожен день.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Вони чудово справляються з перевезенням важких і габаритних предметів, наприклад:

Палети з товарами: AGV часто їздять між зонами приймання, зберігання та відвантаження, перевозячи цілі палети.

Великі контейнери чи деталі: На заводах такі візки можуть підвозити масивні запчастини прямо до конвеєра.

Готова продукція: Доставка запакованих товарів на склад, звідки вони вже поїдуть до магазинів.

Одна з сильних сторін AGV – це їхня відносна простота конструкції і те, що вони дуже надійно працюють, якщо їм не заважати і маршрут не змінювати. Можуть працювати хоч цілодобово, виконуючи монотонну, але важливу роботу.

Головний їх недолік – вони не дуже гнучкі. Якщо на шляху AGV раптом стане якась перешкода, хтось залишив візок або просто стоїть людина, він, швидше за все, зупиниться і чекатиме, поки дорогу звільнять. Самостійно об'їхати щось, що не входить в його програму, він не вміє. А якщо треба змінити планування складу чи маршрути – доведеться фізично перекладати ті ж магнітні стрічки або довго займатися налаштуваннями, що може коштувати чималих грошей.

1.4. Роботизовані системи "товар-до-людини" (Goods-to-Person, GTP) для комплектації замовлень

Збирання замовлень на складі – це дуже часозатратно. Працівники намотують кілометри між стелажми, вишуковуючи потрібні товари зі списків. Щоб якось полегшити цю справу і прискорити процес, люди придумали системи GTP.

Ідея полягає в тому що: навіщо людині бігати за товаром, якщо робот може сам привезти товар, цілий стелаж чи контейнер прямо до її робочого місця? Це звільняє купу часу, який раніше йшов на марні походи. Людина може спокійно стояти на місці й займатися головним – а саме пакуванням замовлення.

Зазвичай у такій GTP-системі є кілька варіантів використання:

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

- *Мобільні роботи:* Це, як правило, невисокі, але досить маневрені роботизовані платформи на колесах. Їхня конструкція дозволяє їм ефективно заїжджати під спеціальні мобільні стелажі або контейнери, трохи їх піднімати за допомогою вбудованого механізму і транспортувати по визначеній зоні складу.
- *Мобільні стелажі або контейнери:* Товари зберігаються не на стаціонарних полицях, а на спеціально розроблених мобільних стелажах або в контейнерах. Ці одиниці зберігання оптимізовані для того, щоб роботи могли їх легко підхопити, перемістити та точно встановити на станції комплектації або назад у зону зберігання.
- *Станції комплектації:* Це спеціально обладнані робочі місця для операторів. Саме сюди мобільні роботи доставляють стелажі з потрібними товарами. Оператор, перебуваючи на одному місці, отримує необхідний стелаж, відбирає з нього вказану кількість товару (часто система допомагає візуальними підказками, наприклад, світловими сигналами, що вказують на потрібну комірку), сканує товар для обліку і розміщує його у відповідний контейнер для формування замовлення.
- *Система управління:* Центральним компонентом, що координує роботу всієї системи, є спеціалізоване програмне забезпечення. Воно інтегрується з WMS, отримує інформацію про актуальні замовлення, відстежує місцезнаходження кожного товару на мобільних стелажах і направляє роботів за потрібними одиницями зберігання в оптимальній послідовності, мінімізуючи час очікування та переміщення.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис 1.3 – Робот Geek+

Одним із перших і, мабуть, найвідоміших прикладів таких систем є технологія, розроблена компанією Kiva Systems, яку згодом придбала Amazon і трансформувала в Amazon Robotics. Їхні характерні помаранчеві роботи, що динамічно пересувають стелажі на величезних фулфілмент-центрах Amazon, стали наочним символом сучасної складської автоматизації. Інші компанії, такі як Geek+ та GreyOrange, також пропонують ефективні та конкурентоспроможні GTP-рішення, які знаходять широке застосування на складах підприємств електронної комерції, у фармацевтичній галузі, роздрібній торгівлі та інших секторах, де швидкість та точність комплектації є критичними [15].

Переваги систем GTP досить значні:

- Істотне підвищення продуктивності: Оператори витрачають значно менше часу на переміщення по складу, концентруючись безпосередньо на відборі та пакуванні товарів.
- Зменшення кількості помилок при комплектації: Автоматизовані підказки системи (наприклад, світлові індикатори, інформація на дисплеї) допомагають мінімізувати людський фактор.
- Оптимізація використання складського простору: Мобільні стелажі можуть розміщуватися значно щільніше, оскільки не потрібні широкі проходи, розраховані на рух людей та традиційної техніки.

- Покращення ергономіки та умов праці: Зменшується фізичне навантаження на працівників, пов'язане з тривалою ходьбою та перенесенням вантажів.

Звісно, впровадження GTP-систем потребує значних початкових інвестицій у спеціалізоване обладнання, програмне забезпечення та, можливо, реорганізацію інфраструктури складу. Однак для компаній з великими обсягами замовлень та широким асортиментом товарів такі системи можуть стати ключовим фактором підвищення операційної ефективності та конкурентоспроможності. Вони демонструють, як роботизовані технології можуть ефективно доповнювати людську працю, беручи на себе найбільш рутинні та фізично виснажливі завдання.

1.5. Порівняльний аналіз існуючих рішень для автоматизації різних складських операцій

Після того, як ми розглянули основні типи мобільних роботів, що працюють на сучасних складах – це автономні мобільні роботи (AMR), автоматизовані керовані візки (AGV) та системи "товар-до-людини" (GTP) – стає зрозуміліше, що кожен з них має свої сильні сторони і найкраще підходить для певних завдань. Щоб остаточно розібратися в їхніх відмінностях і допомогти вибрати найкраще рішення для конкретних потреб, давайте порівняємо їх за ключовими характеристиками.

Критерії, за якими будемо порівнювати:

1. Як орієнтуються та наскільки гнучкі: Тобто, як робот знаходить дорогу і чи легко йому пристосуватися до змін.
2. Як впроваджуються і що треба міняти на складі: Наскільки складно запуснути систему і які зміни потрібні в приміщенні.
3. Яку роботу виконують і скільки можуть перевозити: Для яких операцій та типів вантажів кожен робот підходить найкраще.
4. Як працюють поруч з людьми і наскільки це безпечно: Чи може робот спокійно діяти там, де є персонал.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Скільки коштує запуск та утримання: Початкові та подальші витрати.

А тепер саме порівняння:

- *Автономні мобільні роботи (AMR):*
 - Навігація та гнучкість: Ці роботи досить самостійні. Вони використовують SLAM (за допомогою лазерів та камер), тому дуже гнучкі. Легко адаптуються, якщо на складі щось переставили, і самі знаходять, як об'їхати перешкоду.
 - Інтеграція: Запустити їх в роботу відносно просто. Не треба прокладати спеціальні лінії чи стрічки по всьому складу. Головне – щоб був надійний Wi-Fi.
 - Завдання та вантажопідйомність: В основному перевозять не дуже важкі речі – контейнери, візки, полиці. Зазвичай їхня вантажопідйомність від кількох десятків до кількох сотень кілограмів, хоча є й моделі, що можуть і тонну перевезти.
 - Взаємодія та безпека: Спроектвані так, щоб безпечно працювати поруч з людьми. Мають багато датчиків, щоб нікого не зачепити і вчасно зупинитися.
 - Вартість: Сам робот може коштувати дорожче, але оскільки не треба сильно перебудовувати склад, загалом інвестиції можуть бути виправданими.
- *Автоматизовані керовані візки (AGV):*
 - Навігація та гнучкість: Ці рухаються строго по визначених маршрутах. Це можуть бути магнітні стрічки, намальовані лінії або спеціальні відбивачі для лазерного наведення. Гнучкості тут небагато: якщо щось змінилося – треба все переробляти. Об'їжджати перешкоди поза своїм маршрутом вони зазвичай не вміють.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Інтеграція: Потрібно буде попрацювати, щоб прокласти для них напрямні. Це може зайняти певний час і потребувати ресурсів.
 - Завдання та вантажопідйомність: Добре підходять для повторюваних завдань, особливо для перевезення важких і великих вантажів, таких як палети чи масивні контейнери. Можуть перевозити по кілька тонн.
 - Взаємодія та безпека: Зазвичай працюють у більш відокремлених зонах або там, де є чіткі правила взаємодії з персоналом. Датчики безпеки у них є, але вони менш адаптивні до несподіваних ситуацій, ніж у AMR.
 - Вартість: Сам візок може бути дешевшим, але варто враховувати витрати на встановлення та обслуговування напрямної інфраструктури.
- *Роботизовані системи "товар-до-людини" (GTP):*
 - Навігація та гнучкість: Роботи в таких системах (це часто спеціалізовані AMR або схожі на AGV платформи) рухаються у своїй, окремій зоні зберігання. Орієнтуються вони там по-різному: по QR-кодах, за допомогою SLAM або іншими методами, що дозволяють їм щільно розміщувати стелажі. Якщо треба щось змінити в плануванні самої цієї зони – це може бути непросто.
 - Інтеграція: Тут доведеться серйозно перебудувати частину складу, де будуть зберігатися товари, і встановити спеціальні робочі місця для людей. І, звісно, все це має бути тісно пов'язане з комп'ютерною системою управління складом (WMS).
 - Завдання та вантажопідйомність: Головне їхнє завдання – привозити мобільні стелажі чи контейнери прямо до оператора, який збирає замовлення. Роботи розраховані на вагу такого стелажа з товарами, що зазвичай становить кілька сотень кілограмів.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Взаємодія та безпека: Люди спокійно працюють на своїх стаціонарних місцях, а роботи – у своїй окремій зоні. Вони майже не перетинаються, що підвищує безпеку і дозволяє роботам працювати швидко.
- Вартість: Це найдорожчий варіант на старті, бо треба багато спеціального обладнання, програм і, можливо, перебудов. Але й продуктивність потім значно зростає [13-15].

Таблиця 1

Критерій	AMR	AGV	GTP-системи
Навігація	SLAM, камери, LiDAR	Лінії, магніти, відбивачі	QR-коди, SLAM (в зоні), інше
Гнучкість маршруту	Висока	Низька	Середня (в межах зони GTP)
Об'їзд перешкод	Так, динамічно	Зазвичай ні (зупинка)	Так (в межах зони GTP)
Інфраструктурні зміни	Мінімальні (Wi-Fi)	Значні (лінії, дроти)	Дуже значні (зона зберігання, станції)
Типові вантажі	Контейнери, візки, дрібні товари	Палети, великі вантажі	Мобільні стелажі/контейнери з товарами
Взаємодія з людьми	Безпечна співпраця	Обмежена, часто окремі зони	Мінімальна (люди на станціях)
Початкова вартість системи	Середня/Висока	Низька/Середня (без інфраструктури)	Дуже висока

Що ж у підсумку?

Якого саме робота вибрати для складу, залежить від багатьох речей. Треба враховувати, які саме операції потрібно автоматизувати, які обсяги вантажів, який бюджет є на це все, наскільки важлива гнучкість системи, і чи є можливість щось перебудовувати на складі. AMR найкраще показують себе там, де умови часто змінюються і потрібна адаптивність. AGV все ще залишаються хорошим вибором для стабільних завдань з перевезення великих обсягів вантажів по фіксованих маршрутах. А системи GTP – це потужний інструмент, щоб значно прискорити комплектацію замовлень, особливо якщо їх дуже багато, як, наприклад, в інтернет-торгівлі. Нерідко на великих складах можна побачити, як різні типи роботів працюють разом, кожен виконуючи ту частину роботи, для якої він найкраще пристосований.

1.6. Формулювання вимог до системи керування мобільного робота для автоматизації визначених складських операцій

Після того, як ми розібралися з тим, які технології існують для роботів на складах, і які бувають самі роботи, час визначитися, чого ж ми хочемо від нашого власного проекту. Ми будемо робити систему керування для мобільного робота. Його завдання – допомагати на складі, перевозячи невеликі ящики, вагою десь до 200 кілограмів. Наприклад, він міг би возити їх від місця, де товар приймають, туди, де він чекає на подальшу обробку.

1. Як буде орієнтуватися і знаходити дорогу:

- Має вміти сам собі давати раду на типовому складі де є стелажі, вузькі проходи, можуть ходити люди чи їздити інші машини.
- Під'їжджати до місць, де треба взяти чи покласти ящик, з точністю плюс-мінус 5-10 сантиметрів. Цього має вистачити.
- Щоб малювати карту і розуміти, де він, будемо використовувати SLAM. Для цього поставимо LiDAR і датчики на колеса, щоб рахувати, скільки проїхав.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

- Добре б, щоб він міг працювати з уже готовою картою складу і, можливо, трохи підлаштовуватися, якщо там щось не сильно зміниться.

2. Як буде їздити і маневрувати:

- Колеса: два ведучі, а два просто для опори. Так він зможе добре розвертатися на місці, якщо буде тісно.
- Швидкість: не більше півметра на секунду. І щоб міг плавно розганятися, гальмувати, а де треба – їхати повільніше.
- Має вміти переїжджати невеликі пороги чи нерівності на підлозі,десь сантиметр-два заввишки.

3. Що буде робити з вантажем:

- Скільки може підняти: до 200 кг.
- Розмір вантажу: ящик приблизно 90х70х80 сантиметрів.
- Як буде брати/класти вантаж: для початку, щоб не ускладнювати, просто зробимо горизонтальну платформу, на яку ставиться ящик.
- Точність зупинки для завантаження/розвантаження – в межах тих же 5-10 см.

4. Система керування та програми:

- Саму систему керування зробимо з окремих частин-модулів, щоб було легше розбиратися. Будемо використовувати ROS (операційна система для роботів).
- Має вміти сам собі прокладати маршрут, дивлячись на проєкцію карти і на те, що бачать датчики.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Щоб робот записував основне про свою роботу (куди їздив, чи були помилки, скільки часу працював) – потім подивимося, як він справлявся.

5. Датчики:

- Головний компонент для навігації: LiDAR, щоб бачив навколо хоча б на 270 градусів і на відстань метрів 5-10.
- Допоміжні датчики: на ведучих колесах – датчики обертів (енкодери), щоб рахувати пройдений шлях; простий датчик руху (IMU – акселерометр + гіроскоп), щоб краще розумів, куди він повернутий.
- Датчики безпеки: кілька ультразвукових датчиків по боках, щоб бачити перешкоди дуже близько, особливо там, де лазер не проєцюється; і велика червона кнопка на корпусі, щоб якщо що – можна було миттєво все зупинити.

6. Акумулятори:

- Батарея: літій-іонна або літій-полімерна, зі спеціальною платою, що стежить за її здоров'ям та зарядкою (BMS).
- Скільки має працювати без підзарядки: хоча б 2-3 години, якщо буде активно бігати.
- Зарядка: вручну, підключаючи до розетки.

7. Безпека:

- Має їздити в помірному темпі, щоб не заважати людям – тобто, не дуже швидко і з датчиками, що бачать перешкоди.

8. Інші дрібниці:

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Розміри робота: приблизно 900мм на 700мм (довжина на ширину). Висота – як вийде з платформою, але не більше 300 мм, щоб було зручно проїжджати.
- Будемо намагатися використовувати такі деталі, які можна легко знайти і які не дуже дорогі.

Якщо врахувати всі ці вимоги при створенні системи керування для мобільного робота на складі, то можна отримати дійсно корисний продукт. Він буде працювати ефективно, безпечно та надійно, допомагаючи автоматизувати складські процеси та задовольняючи потреби підприємств [1].

Висновки до розділу 1

У першому розділі ми розглянули автоматизацію складів мобільними роботами. Ми вивчили основні технології для їхньої самостійної роботи. Це стосується навігації, визначення місцезнаходження та планування маршрутів на складі. Також ми проаналізували головні типи мобільних роботів. Це автономні мобільні роботи (AMR). Це також автоматизовані керовані візки (AGV). І ще роботизовані системи "товар-до-людини" (GTP). Стало зрозуміло, що кожна технологія та тип робота мають свої переваги. Вони також мають недоліки та найкраще підходять для певних завдань. Наприклад, AMR дуже гнучкі. Вони вміють адаптуватися до змін завдяки SLAM. AGV менш гнучкі. Вони прив'язані до фіксованих маршрутів. Але AGV добре перевозять важкі вантажі по стабільних шляхах. Системи GTP значно підвищують продуктивність збирання замовлень. Вони зменшують переміщення людей по складу. Після цього аналізу ми сформулювали чіткі вимоги. Ці вимоги стосуються системи керування мобільного робота. Цього робота ми будемо проектувати в дипломній роботі. Ми визначили, що наш робот буде перевозити невеликі ящики на складі. Ми описали вимоги до його навігації та руху. Також до роботи з вантажем, системи керування, програм, датчиків, батареї та безпеки. Ці вимоги будуть основою для подальшої роботи над проектом.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ ДЛЯ ВИКОНАННЯ СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ: СХЕМА ТА КОМПОНЕНТИ

2.1. Блок керування рухом та точним позиціонуванням робота для виконання операцій

Складський робот повинен рухатися точно і акуратно. Для цього йому потрібен блок керування рухом. Цей блок є дуже важливим. Він змушує робота безпечно їхати по заданому шляху. Також він допомагає роботу точно зупинятися в потрібних місцях. Наприклад, щоб забрати або вивантажити ящик.

Що ж саме робить цей блок? Розглянемо його основні функції. Насамперед, він приймає команди. Вказівки надходять від головної системи керування, яка відповідає за планування маршрутів. Звідти приходить інформація про необхідну швидкість та напрямок руху.

Далі, система керує колесами. Отримавши наказ, вона генерує сигнали. Ці сигнали призначені для спеціальних мікросхем, відомих як драйвери. Саме драйвери змушують обертатися мотори коліс. Таким чином, регулюється швидкість кожного ведучого колеса. Це дозволяє роботу рухатися прямо, повертати або виконувати інші маневри [11].

Важливою функцією є підрахунок пройденого шляху. На моторах встановлені датчики-лічильники, які називаються енкодерами. Вони безперервно повідомляють про кількість обертів кожного колеса. Завдяки цьому завжди відома пройдена відстань. Також система знає, наскільки робот здійснив поворот. Ця інформація, або одометрія, є дуже важливою. Вона допомагає системі розуміти, чи все відбувається за планом.

Також необхідно допомагати тримати курс. Робот повинен рухатися рівно. Він має підтримувати задану швидкість. Відхилення від маршруту через дрібниці, наприклад, нерівності підлоги, є небажаними. Для цього існують спеціальні програми-регулятори. Часто це ПІД-регулятори. Вони постійно вносять невеликі корективи в роботу моторів [2].

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, система забезпечує точну зупинку. Коли робот наближається до кінцевої точки або до місця виконання операції, наприклад, під'їжджає до стелажа чи конвеєра, цей компонент допомагає йому зупинитися з максимальною точністю. Для цього можуть використовуватися дані про пройдений шлях. Також можуть братися до уваги підказки від інших датчиків робота, наприклад, лазера чи камер. Це дозволяє в останній момент ідеально вирівняти платформу.

Нарешті, система дбає про плавність руху. Робот не повинен стартувати чи гальмувати різко. Його рухи мають бути плавними. Тому контролюється вся динаміка переміщення. Це особливо важливо під час перевезення вантажу, щоб уникнути його пошкодження.

Щодо апаратної частини. Основою цього блоку зазвичай є мікроконтролер. Наприклад, STM32, ESP32, або навіть Arduino для простих роботів. Або це може бути маленький одноплатний комп'ютер. Він потрібен, якщо треба виконувати багато обчислень. Цей мікроконтролер отримує команди. Він аналізує дані з датчиків. Потім через спеціальні мікросхеми, драйвери моторів, він дає вказівки колесам. Драйвери забезпечують потрібну потужність для обертання. Вони також дозволяють змінювати напрямок руху.

Щоб робот зупинявся справді точно, блок керування рухом тісно взаємодіє з блоком навігації. Це особливо важливо, коли треба щось взяти чи покласти. Від блоку навігації він отримує найсвіжіші дані про місцезнаходження робота. На основі цих даних він може внести необхідні корективи.

2.2. Навігація та локалізація робота в зонах виконання складських операцій

Мобільний робот на складі повинен не просто рухатися, а чітко виконувати завдання. Для цього йому потрібні дві важливі здатності. По-перше, він має завжди точно знати своє місцезнаходження. Цей процес називається локалізацією.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По-друге, робот повинен вміти прокладати шлях до потрібної точки. Це вже навігація. За ці складні, але критично важливі функції відповідає блок навігації та локалізації. Він надає роботу необхідну інформацію для безпечного та розумного пересування по складських приміщеннях.

Розглянемо детальніше, чим саме займається цей блок. Спочатку відбувається створення карти складу або використання вже існуючої. Робот може самостійно згенерувати карту під час першого ознайомчого проїзду. Для цього часто застосовують технологію SLAM. Альтернативно, він може працювати з готовим планом, завантаженим у його систему. На такій карті зазвичай позначені всі стіни, стелажі, проходи та інші стаціонарні об'єкти [16].

Далі, система щомиті визначає положення робота на цій карті. Наявність карти – це лише половина справи. Робот повинен постійно, в реальному часі, розуміти, де саме він знаходиться. Для цього використовуються дані з різних датчиків. Це можуть бути лазери (LiDAR), камери, лічильники на колесах (енкодери) та датчики руху (IMU). Програмна частина аналізує показники сенсорів і порівнює їх із збереженими моделями простору, що дозволяє роботу орієнтуватися та коригувати траєкторію в режимі реального часу. [12].

Коли робот отримує завдання, наприклад, доїхати від зони завантаження до певного стелажа, відбувається прокладання маршруту від старту до фінішу. Блок навігації аналізує карту і планує найкращий шлях. При цьому враховуються всі доступні проходи, повороти та можливі обмеження руху. Життя на складі може бути непередбачуваним. Тому важливою є функція коригування шляху при виникненні перешкод. Якщо на маршруті робота раптом з'являється несподівана перешкода, якої не було на карті, наприклад, забута коробка чи інший робот, блок навігації повинен швидко відреагувати. Разом із системою уникнення зіткнень він може оперативно перепланувати маршрут.

Для деяких завдань, таких як під'їзд до конвеєра або точна зупинка біля полиці для завантаження чи розвантаження, потрібна дуже висока точність.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому система також забезпечує філігранне позиціонування в критичних зонах. Тут можуть використовуватися додаткові методи або більш точні налаштування основних датчиків, щоб уникнути промаху.

Щоб усе це працювало надійно, блок навігації та локалізації зазвичай отримує інформацію від таких компонентів:

- *Лазер (LiDAR)* є основним далекоміром. Він надає дуже точні дані про відстані до навколишніх об'єктів. Це ключовий інструмент для SLAM, тобто самостійного створення карти. Також він допомагає роботу розуміти своє місцезнаходження шляхом порівняння лазерного сканування з картою.
- *Лічильники на колесах (одометрія)* повідомляють, яку відстань робот проїхав і наскільки повернув. Ця інформація корисна, але з часом може накопичувати невелику похибку.
- *Датчик руху (IMU)* допомагає відстежувати зміни в орієнтації робота, такі як нахили чи повороти. Він також може частково компенсувати неточності від лічильників на колесах.
- *Камери* також можуть використовуватися. Наприклад, для візуального SLAM, коли карта створюється на основі зображень. Або для розпізнавання знайомих орієнтирів чи QR-кодів, щоб уточнити позицію робота.

Обробка всіх цих потоків даних та виконання складних розрахунків для навігації – це завдання для бортового комп'ютера робота. Це може бути пристрій типу Raspberry Pi, Nvidia Jetson або інший подібний, оснащений спеціальними програмами. Дуже часто для таких завдань інженери використовують ROS. Це програмний каркас, що надає багато готових інструментів для SLAM, локалізації та навігації [17].

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Безвідмовна робота цього блоку навігації та локалізації є запорукою успіху. Адже від точності визначення положення робота залежить не тільки виконання ним завдань, але й загальна безпека на складі.

2.3. Сенсори для орієнтації, безпеки та контролю виконання операцій

Мобільний робот на складі потребує різних датчиків для самостійної роботи. Ці пристрої допомагають йому безпечно та точно виконувати завдання. Сенсори збирають інформацію про навколишнє середовище. Також вони надають дані про місцезнаходження та стан самого робота. Усі ці датчики можна умовно поділити на групи. Кожна група виконує свої специфічні функції.

1 група сенсорів допомагає роботу орієнтуватися:

- *LiDAR* - це лазерний далекомір. Він безперервно сканує простір навколо себе. Лазерний промінь вимірює відстань до об'єктів. Завдяки цим даним робот може будувати карту приміщення. Він також розуміє своє положення на цій карті. Крім того, LiDAR виявляє перешкоди. На складах зазвичай використовують 2D LiDAR. Такий тип сканує простір в одній горизонтальній площині [9].
- *Енкодери* - це спеціальні датчики обертання. Вони підраховують кількість обертів, зроблених колесами. За цими даними система керування може приблизно визначати пройдену відстань. Також вона оцінює швидкість руху. Цей метод отримання даних називається одометрією. Сам по собі він не є ідеально точним. Колеса іноді можуть трохи прослизати. Проте ця інформація важлива. Вона використовується у складніших алгоритмах для точного визначення положення робота.
- *IMU* - інерційний вимірювальний блок. Він являє собою невеликий пристрій. У ньому містяться акселерометри та гіроскопи. Акселерометри вимірюють прискорення робота. Гіроскопи вимірюють швидкість його обертання. IMU допомагає роботу відстежувати зміни свого положення у просторі. Наприклад, він фіксує нахили чи повороти. Ці дані можуть

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищити точність навігації. Це особливо корисно, якщо підлога нерівна. Або якщо робот виконує різкі маневри.

2 група сенсорів забезпечує безпеку робота та оточуючих:

- *Ехолокація* - вони випромінюють ультразвукові хвилі. Потім вони аналізують відбитий сигнал. За часом повернення звуку визначається відстань до перешкоди. Такі датчики відносно недорогі. Вони добре виявляють об'єкти, що знаходяться дуже близько. Наприклад, безпосередньо перед роботом. Або з боків, де LiDAR може мати сліпі зони.
- *Інфрачервоні датчики* - відстані також здатні виявляти близькі перешкоди. Деякі моделі таких датчиків можуть додатково розпізнавати край поверхні. Наприклад, вони можуть зафіксувати сходинку. Це допомагає запобігти падінню робота.
- *Контактні датчики* - їх також називають бамперами. Це механічні пристрої. Вони спрацьовують при фізичному зіткненні робота з перешкодою. Якщо бампер активувався, робот повинен негайно зупинитися.
- *Кнопка аварійної зупинки* - це зазвичай велика червона кнопка. Людина може натиснути її в екстреній ситуації. Це призведе до миттєвого вимкнення робота, якщо щось піде не так.

3 група сенсорів допомагає контролювати виконання роботом його основних завдань:

- Якщо робот призначений для перевезення ящиків, можна встановити прості датчики наявності або правильного положення вантажу. Це можуть бути оптичні або механічні сенсори. Вони перевіряють, чи коректно розміщений ящик на платформі робота.
- Якщо у конструкції робота є рухомі частини, наприклад, підйомний механізм, то потрібні датчики для контролю роботи цих механізмів. Це

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можуть бути, наприклад, кінцеві вимикачі. Вони спрацьовують, коли механізм досягає крайнього верхнього чи нижнього положення.

- Іноді для виконання специфічних завдань використовують камери. Наприклад, камера може зчитувати штрих-коди на товарах. Або візуально перевіряти правильність завантаження. Чи розпізнавати певні типи об'єктів.

Який саме набір цих датчиків буде оптимальним, залежить від багатьох факторів. Важливо враховувати, що саме має робити робот. Також умови, в яких він буде працювати. І, звичайно, бюджет проекту. Головне завдання полягає не тільки у виборі правильних датчиків. Необхідно також навчити систему керування коректно інтерпретувати їхні сигнали. Це дозволить роботу вчасно та адекватно реагувати на всі події, що відбуваються навколо.

2.4. Блок зв'язку та передачі даних для координації складських операцій

Щоб мобільний робот на складі працював як частина єдиної системи, йому потрібен зв'язок. За це відповідає спеціальний блок. Він з'єднує робота з головними комп'ютерами. Це можуть бути системи управління складом (WMS). Або системи, що керують усіма роботами (FMS). Іноді робот також спілкується з іншими роботами чи навіть з дверима або конвеєрами.

Цей блок зв'язку виконує кілька важливих завдань:

1. Робот отримує завдання та команди. Вони надходять від WMS або FMS. Наприклад, команда може бути простою: "відвези ящик X з місця А в місце Б". Або "забери палету з комірки С". Разом з командою приходять і деталі. Це пріоритет, час на виконання, особливості вантажу. Якщо щось пішло не так, диспетчер FMS може дати команду вручну.
2. Робот постійно звітує про свій стан. Це потрібно для контролю. Він надсилає дані: де він зараз, як швидко їде, куди повернутий. Також повідомляє про заряд батареї, стан своїх механізмів, помилки. Коли завдання виконано, робот надсилає звіт. Там або підтвердження успіху, або пояснення, чому не вийшло.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

3. Коли роботів багато, їхні дії треба координувати. Система FMS використовує дані про місцезнаходження кожного робота. Це допомагає уникнути зіткнень. Маршрути стають оптимальнішими. Завдання розподіляються розумно. Керуються черги до зарядних станцій чи вузьких проходів. Іноді все планує центральна система. А іноді роботи можуть трохи домовлятися між собою.
4. Обслуговувати та оновлювати робота можна на відстані. Блок зв'язку дозволяє проводити діагностику. Через нього завантажують нові програми, прошивки, карти складу. Налаштування теж змінюють дистанційно. Це зручно, бо не треба підходити до кожного робота.
5. Робот може "спілкуватися" з інфраструктурою складу. Йому може знадобитися обмінюватися сигналами з автоматичними дверима. Або зі шлагбаумами, ліфтами, конвеєрами. Навіть зі світлофорами на складських доріжках. Можлива і взаємодія з системами, що розпізнають вантаж, наприклад, за RFID-мітками.

Для зв'язку на складах найчастіше використовують Wi-Fi. Він працює на частотах 2.4 ГГц або 5 ГГц. Головне, щоб мережа стабільно покривала всю робочу зону. Зв'язок має бути швидким, без затримок. У важливих місцях можуть ставити спеціальні промислові точки доступу. Вони надійніші.

Що стосується елемента зв'язку на самому роботі, то це зазвичай:

- Wi-Fi модуль. Він може бути вбудований в головний комп'ютер робота, як у Raspberry Pi 4. Або, якщо керує мікроконтролер, використовують зовнішні модулі типу ESP8266/ESP32.
- Антена. Щоб краще ловити сигнал, особливо серед металевих стелажів, іноді ставлять зовнішню Wi-Fi антену.

Програмна частина зв'язку використовує стандартні мережеві протоколи, такі як TCP/IP та UDP. А для обміну вже готовими даними застосовують протоколи прикладного рівня. Часто можна зустріти:

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

- MQTT. Це легкий протокол, добре підходить для передачі команд та даних про стан робота.
- HTTP/REST API. Використовується для зв'язку з веб-сервісами WMS/FMS.
- Інструменти ROS. Якщо робот працює на ROS, то для зв'язку по мережі використовуються його власні механізми.
- Промислові стандарти. Іноді застосовують OPC UA або VDA 5050. Вони допомагають різному обладнанню "розуміти" одне одного.

Дуже важливо, щоб зв'язок був надійним і безпечним. Потрібне шифрування даних та перевірка доступу. Тільки так мобільні роботи зможуть ефективно та злагоджено працювати на сучасному автоматизованому складі.

2.5. Механізми для виконання складських операцій та їх керування

Щоб наш мобільний робот на складі не просто катався, а й міг працювати з вантажами, йому потрібні спеціальні механізми. Якими вони будуть – залежить від того, що саме робот має робити. У нашому випадку, коли робот возить контейнери, головними будуть такі частини:

- *Транспортна платформа:* Це, по суті, спина робота, на якій лежить вантаж, тобто контейнер. Платформа має бути міцною, щоб витримати вагу, розраховуємо десь до 200 кг. І достатньо великою, щоб стандартний контейнер стояв на ній стабільно. Зробити її можна з металу, наприклад, алюмінію – він легкий і міцний. Або з хорошого, твердого пластику. Добре б ще покрити її чимось, щоб вантаж не ковзав.
- *Простий підйомник:* Якщо роботу треба не тільки возити контейнери, а й трохи їх піднімати чи опускати (наприклад, щоб поставити на конвеєр іншої висоти або на нижню полицю стелажа), можна додати невеликий підйомний механізм. Для неважких вантажів це може бути:
 - *Ножичний підйомник:* Він піднімає вантаж вертикально і в складеному вигляді займає мало місця.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

- Важільний механізм: Його простіше зробити, але він може піднімати не дуже високо.
Такі механізми зазвичай рухає окремий електромотор з редуктором. Це може бути кроковий двигун, якщо треба дуже точно виставляти висоту. Або звичайний DC двигун з черв'ячною передачею, щоб міг утримувати вагу. Іноді використовують готові лінійні актуатори.
- Щось для фіксації вантажу (теж за потреби): Щоб контейнер не з'їхав і не впав, поки робот їде, особливо якщо він маневрує або підлога нерівна, можна придумати прості механічні фіксатори. Або якісь висувні упори. Якщо контейнери металеві, то можна навіть електромагнітні затискачі.

Керувати всіма цими механізмами буде мікроконтролер (наприклад, той самий STM32 або ESP32, що вже керує рухом). Він отримуватиме команди від головного комп'ютера (Raspberry Pi) і даватиме сигнали на драйвери моторів підйомника чи приводів фіксаторів.

Щоб усе працювало точно і безпечно, потрібні й відповідні датчики:

- Кінцеві вимикачі: Це маленькі кнопочки, які сигналізують, що механізм доїхав до крайнього положення (наприклад, платформа піднялася на максимальну висоту).
- Датчики положення: потенціометри або енкодери на валу мотора підйомника. Вони дозволяють точно знати, в якому положенні зараз механізм.
- Датчики вантажу: Оптичні або індуктивні можуть перевірити, чи правильно стоїть контейнер на платформі, перш ніж робот поїде або почне щось робити.

надається за запитом до авторів

Рис. 2.5 – Функціональна схема

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зробити надійні та ефективні механізми – це важливе завдання. Адже від того, як вони працюватимуть, залежить, чи зможе робот виконувати свої головні функції на складі [18].

2.6. Система живлення та забезпечення безперервності виконання операцій

Робот на складі має працювати довго. Без перерв. Тому йому потрібна енергія. Ми будемо використовувати акумулятори. Для роботів зараз часто беруть літієві. Або літій-іонні, або літій-полімерні, бо вони легкі і маленькі. А енергії тримають багато. Ще й служать довго.

Акумуляторні батареї: типу Li-ion 18650. Чому саме такі? Це досить поширені літій-іонні батареї. Вони непогано тримають заряд, відносно доступні і їх легко знайти. "Li-ion" означає, що вони літій-іонні, а це добре, бо у них немає "ефекту пам'яті", як у старих акумуляторів, і вони можуть віддавати пристойний струм.

- *Система управління живленням:* для цього у нас буде одна плата BMS (Battery Management System).

BMS – це дуже важлива штука для літієвих акумуляторів. Без неї ніяк. Вона, як розумний наглядач, стежить за кожною батареєю в нашій збірці. Що вона робить? По-перше, не дає акумуляторам перезарядитися, коли ми їх заряджаємо. По-друге, не дає їм розрядитися аж занадто сильно, бо це для них шкідливо. Також вона захищає від короткого замикання, якщо раптом щось піде не так. А ще вона намагається вирівнювати заряд на всіх чотирьох батареях, щоб вони працювали паралельно і довше служили. Для нашої збірки послідовно з'єднаних елементів потрібна буде відповідна BMS, розрахована саме на таку конфігурацію.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- *Зарядний пристрій:* тут ми плануємо використовувати один зарядний модуль типу TP4056, або щось подібне, але розраховане на нашу збірку. Модуль TP4056 – це популярна і недорога плата для зарядки літій-іонного елемента.

Висновки до розділу 2

Отже, другий розділ нашої роботи був присвячений тому, щоб розібратися, з яких саме «цеглинок» складатиметься система керування нашого мобільного робота. Того самого, що має стати помічником на складі. Ми, так би мовити, розклали всю цю складну систему на основні частини, або функціональні блоки. Для кожного такого блоку ми визначили, за що він відповідатиме, які завдання перед ним стоятимуть, і як вони всі разом мають злагоджено працювати, щоб робот виконував свою роботу.

Якщо коротко, то ми розглянули такі ключові моменти. По-перше, це блок керування рухом та точним позиціонуванням. Його робота – перетворювати команди від головного комп'ютера на сигнали для моторів. Він також дбає про те, щоб робот їхав точно за планом. Далі йде блок навігації та локалізації. Ця частина допомагає роботу не губитися на складі, вміти малювати карту або користуватися вже готовою, і завжди чітко розуміти, де він зараз знаходиться. Звісно, без «очей та вух» нікуди, тому ми обговорили сенсорну систему. Це цілий набір різних датчиків. Одні потрібні для навігації, інші – для безпеки, треті – для контролю за тим, як виконуються завдання. Всі вони дають роботу необхідну інформацію про те, що відбувається навколо, і про його власний стан.

Для забезпечення інтеграції робота у логістичну мережу застосовується модуль комунікації, що дозволяє обмінюватися інформацією із зовнішніми системами управління (WMS, FMS). Саме через цей блок робот отримує завдання, передає звіти про виконану роботу та узгоджує свої дії з іншими.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки наш робот має працювати з вантажами, ми також розглянули механізми для виконання складських операцій. Це, в першу чергу, транспортна платформа. Можливо, знадобляться і прості підйомники чи якісь фіксатори для вантажу, разом з їхніми нескладними системами керування. І, нарешті, система живлення. Вона включає акумулятор, плату контролю за ним (BMS) та різні перетворювачі напруги.

Все це потрібно, щоб робот міг довго працювати сам, без підзарядки.

Для кожного з цих блоків ми приблизно визначилися, які деталі та компоненти можна було б використати. Наприклад, для складних розрахунків ми плануємо взяти одноплатний комп'ютер, щось типу Raspberry Pi 4. А для керування моторами та іншими простішими речами – мікроконтролер, наприклад, STM32 або ESP32. Орієнтуватися робот буде за допомогою 2D LiDAR, а також даних з коліс та датчика руху IMU. Зв'язок із зовнішнім світом – по Wi-Fi. Їздитиме наш робот за допомогою диференціального приводу, а енергію братиме від літій-іонної батареї.

Таким чином, можна сказати, що у другому розділі ми заклали такий собі фундамент – і теоретичний, і апаратний – для нашого майбутнього мобільного складського робота. Тепер, коли ми маємо уявлення, з чого він буде складатися, можна рухатися далі. Наступні кроки – це математичне моделювання його поведінки та розрахунок ключових параметрів.

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА ТА ПРОЦЕСІВ СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ

3.1. Кінематична модель руху складського робота

Щоб зрозуміти, як наш мобільний робот буде їздити по складу, нам потрібна кінематична модель. Вона описує сам рух, не заглиблюючись у те, які сили його викликають. Тобто, ми поки що не думаємо про тертя, вагу чи потужність моторів. Головне для цієї моделі – встановити математичний зв'язок. Зв'язок між тим, як швидко робот їде, як швидко крутяться його колеса, і як при цьому змінюється його положення та напрямок руху в просторі. Без

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

такої моделі дуже важко написати програми, які б керували рухом робота або планували для нього маршрути.

Давайте розглянемо робота, у якого два ведучі колеса розташовані на одній осі. Швидкістю кожного з цих коліс можна керувати окремо. Це називається диференціальний привід. Зазвичай у таких роботів є ще одне або кілька коліс чи роликів, які просто підтримують його і не мають моторів. Вони потрібні для стійкості.

Щоб описати, де знаходиться робот на підлозі складу, введемо звичайну систему координат (X, Y) . Положення робота в цій системі ми будемо визначати за координатами (x, y) якоїсь однієї точки на ньому. Зазвичай це середина осі, на якій знаходяться ведучі колеса. А ще нам потрібен кут орієнтації θ . Це кут між тим, куди «дивиться» робот (його поздовжня вісь), і віссю X нашої системи координат. Отже, положення робота можна описати трьома числами: x , y , та θ .

Щоб модель була простішою, зробимо кілька припущень:

1. Робот їздить по рівній горизонтальній підлозі.
2. Колеса не прослизують по підлозі, тобто котяться чисто.
3. Самі колеса не деформуються під час руху.

Нехай радіус ведучих коліс буде R (будемо вважати, що обидва колеса однакові). А відстань між центрами цих коліс (це називається база робота) – L . Позначимо швидкості правого та лівого ведучих коліс як vR та vL . Ці швидкості залежать від того, як швидко обертаються колеса (позначимо кутові швидкості як ωR та ωL): $vR = \omega R \cdot R$, і так само $vL = \omega L \cdot R$.

Тепер найцікавіше. Швидкість v самого центру робота (середини осі коліс) та швидкість, з якою він повертає ω (тобто, як швидко змінюється його кут орієнтації θ), можна виразити через швидкості коліс:

$$v = (vR + vL) / 2$$

$$\omega = (vR - vL) / L$$

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці формули показують просту річ. Якщо робот має їхати прямо (тобто не повертати, $\omega = 0$), то швидкості обох коліс мають бути однаковими ($vR = vL$). А якщо він має крутитися на місці (тобто не їхати вперед, $v = 0$), то швидкості коліс мають бути однакові за величиною, але спрямовані в різні боки ($vR = -vL$).

Як змінюється положення робота з часом, описують диференціальні рівняння. Вони пов'язують те, як швидко змінюються координати та кут орієнтації, зі швидкістю руху та швидкістю повороту робота:

$$dx/dt = v \cdot \cos(\theta) \quad (3.1)$$

$$dy/dt = v \cdot \sin(\theta) \quad (3.2)$$

$$d\theta/dt = \omega \quad (3.3)$$

Якщо ми підставимо формули (3.1) та (3.2) у формули (3.4)-(3.6), то отримаємо повну кінематичну модель нашого робота. Вона показує, як швидкості обертання коліс впливають на рух робота в нашій системі координат:

$$dx/dt = ((\omega R + \omega L) \cdot R / 2) \cdot \cos(\theta) \quad (3.4)$$

$$dy/dt = ((\omega R + \omega L) \cdot R / 2) \cdot \sin(\theta) \quad (3.5)$$

$$d\theta/dt = (\omega R - \omega L) \cdot R / L \quad (3.6)$$

Саме ця модель стає фундаментом, коли ми пишемо програми для керування рухом. Ми можемо задавати, як швидко мають крутитися колеса (ці швидкості ωR та ωL). І таким чином змушувати робота їхати туди, куди нам потрібно, по задуманій траєкторії. Ще цю модель використовують системи одометрії. Це такі системи, що намагаються зрозуміти, де зараз робот, дивлячись на дані з датчиків, що стоять на колесах. Але тут важливо не забувати: наша модель не ідеальна. Вона спирається на певні припущення, які ми зробили раніше. І головне з них – що колеса не прослизують. Якщо вони почнуть ковзати, точність моделі знизиться [9].

3.2. Динамічна модель руху робота з вантажем

Динамічна модель заглядає глибше і пояснює, чому він рухається саме так. Вона встановлює зв'язок між усіма силами та моментами, що на нього

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

діють, і тим, як він прискорюється. Тобто, як швидко він набирає швидкість або починає повертати. Розуміти динаміку – це дуже важливо. Без цього важко створити справді ефективні системи керування. Адже такі системи мають не просто вести робота по правильному шляху. Вони ще й повинні забезпечувати потрібну швидкість реакції на команди. А ще динаміка допомагає прикинути, скільки енергії, робот буде витрачати. Для нашого складського робота це стає особливо актуальним. Чому? Бо він часто возить вантажі.

А вантаж – це додаткова маса. І ця маса суттєво впливає на те, наскільки легко робота розігнати чи змусити повернути. Тобто, змінюється його момент інерції. Щоб описати динаміку нашого мобільного робота, який має диференціальний привід і ще й тягає вантаж, можна піти кількома шляхами. Наприклад, використати рівняння Лагранжа другого роду. Або ж закони Ньютона-Ейлера. Давайте розглянемо підхід на основі законів Ньютона.

Зробимо ті ж припущення, що й для кінематичної моделі (рух по рівній підлозі, колеса не ковзають). І додамо ще кілька:

1. Будемо вважати, що центр мас усього робота разом з вантажем знаходиться на його поздовжній осі симетрії. Це спрощення, бо насправді положення вантажу може зміщувати загальний центр мас системи "робот+вантаж".
2. Будемо розглядати робота як тверде тіло, що не деформується.

Нехай m – це загальна маса всієї системи "робот + вантаж". А I – це момент інерції цієї системи відносно вертикальної осі, що проходить через її центр мас. На робота діють сили тяги, які створюють ведучі колеса. Позначимо їх FR (від правого колеса) та FL (від лівого). Ці сили залежать від крутних моментів τR та τL , які розвивають мотори: $FR = \tau R / R$ та $FL = \tau L / R$ (де R – це радіус колеса). Також на робота діють сили, що заважають руху. Їх можна узагальнено назвати силою тертя кочення Ff .

Рівняння руху для поступального руху центру мас робота тобто, як він рухається вперед-назад та для обертального руху як він повертає будуть виглядати так:

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$m \cdot (dv/dt) = FR + FL - Ff \quad (3.7)$$

$$I \cdot (d\omega/dt) = (FR - FL) \cdot (L / 2) \quad (3.8)$$

Тут:

- dv/dt – це лінійне прискорення центру мас робота.
- $d\omega/dt$ – це кутове прискорення робота.
- L – це база робота, відстань між колесами.

Якщо ми підставимо вирази для сил тяги через моменти моторів, то отримаємо:

$$m \cdot (dv/dt) = (\tau_R / R) + (\tau_L / R) - Ff$$

$$I \cdot (d\omega/dt) = ((\tau_R / R) - (\tau_L / R)) \cdot (L / 2)$$

Ці рівняння пов'язують те, як ми керуємо роботом (моменти моторів τ_R та τ_L), з тим, як він прискорюється. Сила тертя Ff може залежати від швидкості руху та від того, по якій поверхні їде робот.

Важливо пам'ятати, що вантаж змінює і загальну масу m , і момент інерції I всієї системи. Якщо m_r та I_r – це маса та момент інерції порожнього робота, а m_c та I_c – це маса та момент інерції самого вантажу відносно осі обертання робота (це залежить від того, де саме вантаж лежить на платформі), то:

$$m = m_r + m_c$$

$I = I_r + I_{\text{ефективне}}$ (тут $I_{\text{ефективне}}$ враховує і власний момент інерції вантажу, і те, наскільки він зміщений відносно центру мас робота – це розраховується за теоремою Гюйгенса-Штейнера) [18].

Для чого потрібна динамічна модель?

- Щоб розраховувати, які моменти мають видавати мотори, аби робот прискорювався так, як нам потрібно.
- Щоб аналізувати, як маса вантажу впливає на те, як робот рухається, і скільки енергії він при цьому витрачає.
- Щоб розробляти більш точні програми керування, які враховують, наскільки важко розігнати чи повернути робота.

- Щоб проводити комп'ютерні симуляції руху робота, враховуючи всі фізичні обмеження.

3.3. Модель системи навігації та визначення положення робота на складі

Модель системи навігації та локалізації описує, як складський робот визначає своє положення у просторі. Також вона пояснює, як він будує карту навколишнього середовища на складі.

Ця модель є дуже важливою частиною системи керування. Вона надає інформацію, необхідну для планування маршруту. Також ця інформація потрібна для уникнення перешкод у складських умовах.

Основними компонентами такої моделі є наступні.

Модель вимірювання. Вона описує, як датчики робота збирають інформацію про складське середовище. Наприклад, LiDAR вимірює відстань до стелажів та інших об'єктів. Камера може отримувати зображення для розпізнавання маркерів. Енкодери на колесах надають дані про рух. GPS у складських приміщеннях зазвичай не використовується.

Модель руху. Ця частина описує, як робот переміщується у просторі складу. Вона може базуватися на кінематичній або динамічній моделі робота. Ці моделі були описані раніше.

Алгоритм локалізації. Він використовує дані з датчиків та модель руху. На основі цих даних оцінюється поточне положення робота на складі. Існує декілька підходів до локалізації. Наприклад, фільтр Калмана. Це рекурсивний алгоритм. Він оцінює стан системи, тобто положення робота. Оцінка базується на попередніх даних та нових вимірюваннях. Іншим важливим алгоритмом є SLAM. Також може використовуватися візуальна одометрія. [12].

Алгоритм картографування. Він використовує дані з датчиків та інформацію про положення робота. На основі цих даних будується карта складського середовища. Карта може бути двовимірною (2D) або тривимірною (3D). Це залежить від використовуваних датчиків та алгоритмів. Для складів часто достатньо 2D карти.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Алгоритм SLAM функціонує поетапно. Спочатку сенсор (наприклад, LiDAR) отримує просторові дані — це так звана «хмара точок». Далі ці дані зіставляються з попередніми вимірами, що дозволяє оцінити переміщення пристрою у просторі. Після цього SLAM формує карту на основі об'єднаних даних з різних позицій.

За наявності додаткових джерел (наприклад, GPS), результат уточнюється для підвищення точності. Вимоги до моделі навігації та локалізації на складі:

- *Точність.* Модель повинна забезпечувати високу точність визначення положення та побудови карти. Це особливо важливо в умовах вузьких проходів між стелажми. Або за наявності рухомих об'єктів, таких як персонал чи інша техніка.
- *Надійність.* Модель має бути стійкою до похибок вимірювань. Також вона повинна адаптуватися до змін у складському середовищі.
- *Обчислювальна ефективність.* Алгоритми локалізації та картографування повинні працювати швидко. Вони мають бути ефективними, щоб функціонувати в режимі реального часу на обмежених обчислювальних ресурсах робота.

Модель системи навігації та локалізації для складського робота може бути вдосконалена. Це можна зробити шляхом застосування більш точних сенсорів. Наприклад, LiDAR з вищою роздільною здатністю. Або камери з кращими характеристиками для розпізнавання об'єктів. Також можна використовувати більш досконалі алгоритми. Наприклад, алгоритми SLAM, які враховують семантичну інформацію про об'єкти. Це може бути тип об'єкта: стелаж, палета, людина. Комбінація різних сенсорів також може покращити модель. Вдосконалення моделі системи навігації та локалізації дозволить підвищити точність. Також це покращить надійність та ефективність роботи мобільного робота на складі.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4. Модель виявлення та об'їзду перешкод в динамічному складському середовищі

Одна з найважливіших речей, яку має вміти автономний мобільний робот на складі – це безпечно їздити. Він повинен уникати зіткнень як з нерухомими об'єктами (стелажами, стінами, обладнанням), так і з рухомими (людьми, іншими роботами, навантажувачами).

Математична модель системи виявлення та об'їзду перешкод якраз і описує, як робот отримує інформацію про те, що йому заважає, і на основі цього планує невеликі маневри, щоб уникнути зіткнення.

Цей процес зазвичай складається з кількох кроків:

1. Побачити і зрозуміти, що заважає:

- Робот використовує дані з датчиків (в першу чергу з LiDAR, а також з ультразвукових датчиків або камер), щоб знайти об'єкти навколо себе.
- Дані з LiDAR (це набір точок у просторі) обробляються. З них виділяють окремі перешкоди, визначають їхні контури або простір, який вони займають.
- Часто для представлення перешкод використовують так звану локальну карту заповненості. Це невеличкий шматочок карти навколо робота. Кожна клітинка на цій карті показує, наскільки ймовірно, що вона зайнята перешкодою. Ця карта постійно оновлюється, як тільки приходять нові дані з датчиків.

2. Передбачити, куди рухаються інші:

- Якщо система вміє розпізнавати та стежити за рухомими об'єктами (наприклад, людьми чи іншими роботами), вона може спробувати вгадати, куди вони поїдуть або підуть найближчим часом. Це дозволяє планувати об'їзд не тільки там, де перешкода зараз, а й там, де вона може опинитися. Для цього можуть використовувати фільтри Калмана або складніші моделі прогнозування.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Спланувати, як об'їхати:

- Маючи інформацію про перешкоди (наприклад, у вигляді локальної карти) та знаючи, куди йому треба їхати в кінцевому підсумку, система повинна швидко придумати безпечний та ефективний маневр на найближчий час. Тобто, вирішити, з якою швидкістю і куди повернути [7].
- Існує багато програм-алгоритмів для цього. Ось деякі популярні:
 - **Dynamic Window Approach (DWA):** Цей метод працює зі швидкостями робота. Він генерує набір можливих пар (швидкість руху вперед, швидкість повороту) на короткий час уперед, враховуючи, як швидко робот може розганятися чи повертати. Для кожної такої пари швидкостей програма уявляє, якою буде траєкторія, і оцінює, наскільки вона безпечна (як далеко до перешкод), чи веде вона до цілі, і наскільки плавною буде поїздка. Потім обирається найкраща пара швидкостей.
 - **Vector Field Histogram (VFH) та його варіанти (VFH+, VFH·):** Ці методи будують таку собі діаграму, яка показує, де навколо робота є перешкоди, а де вільно. Потім аналізуються «вільні» напрямки, і обирається той, що найкраще веде до цілі і є достатньо широким, щоб робот міг проїхати.
 - **Elastic Bands (Еластичні стрічки):** Тут глобальний шлях до цілі уявляється як еластична стрічка. Ця стрічка ніби відштовхується від перешкод і деформується, але при цьому залишається натягнутою між початковою та кінцевою точками.

- RRT (Швидко досліджуючі випадкові дерева) на локальній карті: Ці алгоритми можуть швидко знаходити шлях у невеликому просторі навколо робота.

Коли робот вибирає, як саме маневрувати, він часто використовує так звану вартісну функцію. Вона оцінює кожну можливу траєкторію або набір команд за кількома критеріями:

- Наскільки це безпечно (як далеко до найближчої перешкоди).
- Наскільки це ефективно (як швидко робот наближається до своєї проміжної цілі на глобальному шляху).
- Наскільки плавно він буде рухатися (щоб не було різких ривків).
- Чи відповідає це можливостям самого робота (чи зможе він так швидко розігнатися або повернути).

Система уникнення перешкод повинна працювати дуже швидко, в режимі реального часу, миттєво реагуючи на зміни навколо. Вона тісно співпрацює з блоком керування рухом, передаючи йому розраховані безпечні швидкості та напрямки. Від того, наскільки добре працює ця система, безпосередньо залежить безпека та продуктивність мобільного робота на складі [19].

3.5. Модель обробки сигналів та прийняття рішень для керування операціями

Щоб мобільний робот на складі працював ефективно, він має не тільки вміти їздити і об'їжджати перешкоди. Дуже важливо, щоб його система керування могла добре обробляти різну інформацію. І на основі цієї інформації приймати правильні рішення. Модель обробки сигналів та прийняття рішень якраз і описує, як працює логіка системи керування вищого рівня. Ця система координує всі частини робота, щоб він досягав поставленої мети.

Цю модель можна уявити як структуру з кількох рівнів. Інформація на кожному рівні проходить свою обробку. Спочатку відбувається збір та первинна обробка вхідних сигналів:

Мобільна платформа збирає сигнали з низки сенсорних модулів — таких як

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лідар, інерційні датчики, енкодери, ультразвук тощо. Дані проходять попередню фільтрацію, де видаляються шумові складові, а також виконується калібрування для покращення точності. Перетворюють у зручний для подальшої роботи формат.

Також робот отримує команди від системи управління складом (WMS/FMS). Це завдання на виконання операцій. Наприклад, "перевезти контейнер з точки А в точку Б". Або "під'їхати до станції завантаження". Ці команди надходять через блок зв'язку.

Ще одне джерело інформації – це карта. З неї робот бере дані про нерухомі об'єкти. Про дозволені зони для руху. Про те, де знаходяться ключові точки: місця завантаження/розвантаження, зарядні станції.

Далі система має зрозуміти поточну ситуацію:

На основі оброблених даних з сенсорів та карти система навігації визначає, де зараз робот. Тобто, його поточне положення та орієнтацію.

Система виявлення перешкод знаходить об'єкти навколо робота. Вона оцінює, наскільки вони небезпечні.

Також система контролює стан самого робота. Наприклад, скільки заряду залишилося в батареї. Чи справні двигуни. В якому стані механізми для роботи з вантажем.

У підсумку формується загальне уявлення про те, що відбувається. Де робот, що навколо нього, яке завдання він виконує, які є обмеження.

Потім настає етап прийняття рішень та планування дій. Це серце моделі:

На цьому етапі система керування приймає рішення про те, що робити далі.

Вона вже має інформацію про поточний стан. Знає цільове завдання. І враховує можливі обмеження.

Для складських операцій це може бути різне. Наприклад, вибір наступної проміжної цілі або дії. Якщо робот зараз везе вантаж, то наступною дією може бути рух до наступної точки маршруту. А якщо він вже приїхав на місце, то наступною дією може бути команда механізму завантаження чи розвантаження.

Якщо робот отримав нове завдання, система розраховує найкращий шлях до

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цілі. Це планування глобального маршруту.

Також відбувається локальне планування руху. І уникнення перешкод. Про це ми говорили в попередньому підрозділі. Генеруються команди для безпечного руху.

Система також керує виконавчими механізмами. Вона подає команди на підйом чи опускання платформи. Або на фіксацію вантажу.

Важливою є і обробка нештатних ситуацій. Якщо система виявила помилку, або батарея майже сіла, або завдання виконати неможливо, вона має вирішити, що робити. Наприклад, зупинитися. Або повідомити оператора. Чи поїхати на зарядку.

Для реалізації цього рівня використовують різні підходи. Наприклад, машини скінченних станів (FSM). Тут поведінка робота описується як набір станів.

Скажімо, "чекаю завдання", "їду завантажуватися", "завантажуюся", "їду розвантажуватися", "розвантажуюся", "повертаюся на базу". І є правила переходів між цими станами. Вони залежать від подій та умов.

Ще є дерева поведінки. Це більш гнучкий спосіб опису складної поведінки, ніж FSM. Він дозволяє комбінувати простіші блоки поведінки (дії, умови, послідовності) у складні структури.

Для дуже складних сценаріїв можуть використовувати планувальники завдань. Вони генерують цілу послідовність дій, щоб досягти мети. При цьому враховують, що потрібно для кожної дії, і який буде результат.

І наостанок, генеруються вихідні сигнали. Це команди для виконавчих рівнів: На основі прийнятих рішень система формує конкретні команди. Вони йдуть до блоку керування рухом (це задані швидкості). А також до блоку керування виконавчими механізмами. І до блоку зв'язку, щоб передати інформацію про статус.

Ця модель забезпечує те, що робот поводить себе цілеспрямовано. Вона має бути достатньо гнучкою. Щоб робот міг підлаштовуватися до змін у завданнях та оточенні. І достатньо надійною. Щоб забезпечити безпечне та ефективне

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виконання роботи на складі. Програми для такої моделі часто пишуть, використовуючи архітектуру на базі ROS [17]. Там різні частини програми, так звані вузли, відповідають за окремі етапи обробки сигналів та прийняття рішень.

3.6. Модель роботи механізмів, задіяних у складських операціях

Крім того, як сам робот їздить і знаходить дорогу, є ще одна важлива річ. Щоб він міг повноцінно працювати на складі, треба подумати і про те, як працюють його механізми. Ті, що допомагають йому взаємодіяти з вантажем. Наш робот возить контейнери. Тому в нього може бути просто платформа. Або, якщо треба щось більше, то механізм, який цю платформу піднімає і опускає. Давайте уявимо собі просту модель для такого механізму. Того, що вертикально піднімає платформу з ящиком. Цей механізм може рухатися. Наприклад, від електродвигуна через гвинтову передачу. Або через систему важелів.

Спочатку про те, як він рухається, без урахування сил. Це кінематика. Вона показує зв'язок. Між тим, як спрацював привод – наприклад, наскільки крутнувся вал двигуна. Або наскільки висунувся шток. І тим, наскільки піднялася платформа з вантажем. Якщо це гвинтова передача, то висота підйому залежить від кута повороту гвинта. І від його кроку. Якщо ж це важелі, то там все складніше. Залежить від того, які ці важелі. Швидкість, з якою платформа їде вгору-вниз, теж пов'язана зі швидкістю двигуна. Тут ще грає роль редуктор, якщо він є. І сам механізм передачі.

Тепер про сили та моменти. Це вже динаміка. Вона розказує, що діє на механізм, коли він піднімає чи опускає вантаж. Головне рівняння для приводу підйомника враховує кілька речей. По-перше, наскільки важко розкрутити рухомі частини самого приводу. Це момент інерції. По-друге, яку силу дає сам двигун. Це його момент. По-третє, як вантаж заважає руху. Це момент опору від ваги. І, по-четверте, тертя в механізмі. Воно теж створює опір. Виходить, що

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

прискорення вала двигуна залежить від того, наскільки момент двигуна більший за суму всіх опорів.

Момент опору від ваги вантажу – штука непроста. Він залежить від маси ящика. Від сили тяжіння. Від того, наскільки добре працює сам механізм передачі. І яке в нього передаточне число. Для простого підйому через редуктор цей опір можна приблизно порахувати. Треба знати вагу, ефективний радіус, на якому ця вага діє, передаточне число і ККД редуктора. А тертя в механізмі може залежати від швидкості. І від того, наскільки важкий вантаж.

Ну і як цим усім керувати? Зазвичай роблять систему зі зворотним зв'язком. Мікроконтролер отримує команду. Наприклад, підняти платформу на певну висоту. Або рухати її з певною швидкістю. Потім він дає сигнал на драйвер двигуна підйомника.

Щоб знати, що відбувається, потрібні датчики. Наприклад, енкодер на валу двигуна. Він дозволяє точно знати кут повороту, швидкість, а отже, і висоту підйому. Маленькі кнопочки, кінцеві вимикачі, кажуть, коли механізм дійшов до кінця. Наприклад, до максимальної висоти. Це щоб нічого не зламалося. А датчики струму двигуна можуть помітити, якщо щось заклинило або двигун перевантажений. Щоб платформа зупинялася точно на потрібній висоті, можуть використовувати ПІД-регулятори. Вони постійно порівнюють, де платформа має бути, і де вона є, і виправляють помилку.

Навіщо взагалі потрібна ця модель механізмів? По-перше, щоб правильно вибрати двигун і редуктор для підйомника. Враховуючи вагу вантажу і потрібну швидкість. По-друге, щоб написати програми керування. Такі, щоб платформа рухалася плавно і точно. По-третє, щоб прикинути, скільки енергії піде на роботу з вантажем. І по-четверте, щоб перевірити, чи витримають деталі самого механізму.

надається за запитом до авторів

Рис. 3.1 – Структурна схема

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 3

У третьому розділі цієї дипломної роботи ми розглянули основні математичні моделі. Вони описують, як функціонує мобільний робот для автоматизації складських операцій. А також його система керування. Створення цих моделей – це важливий етап. Він дозволяє формалізувати поведінку робота. Проаналізувати ключові процеси. І закласти теоретичну основу для розробки програм керування.

Ми представили такі моделі:

Спочатку кінематичну модель руху складського робота. Тут описані рівняння, що пов'язують швидкості ведучих коліс робота з диференціальним приводом з його загальною швидкістю руху та швидкістю повороту. А також зі зміною його положення та напрямку руху в глобальній системі координат.

Ця модель є базовою для планування шляхів та для того, щоб робот міг приблизно визначати своє місцезнаходження за даними з коліс.

Потім динамічну модель руху робота з вантажем. Ми розглянули рівняння руху, які враховують сили тяги моторів, сили опору. А також загальну масу та момент інерції всієї системи "робот-вантаж". Динамічна модель дозволяє аналізувати, як навантаження впливає на поведінку робота. І розраховувати, які управляючі моменти потрібні від моторів.

Далі йшла модель системи навігації та визначення положення на складі. Ми описали підхід до ймовірнісної локалізації. Він включає модель руху, тобто передбачення, де робот буде. І модель вимірювань, тобто коригування цього передбачення на основі даних з датчиків, наприклад, LiDAR. Згадали такі методи, як фільтри Калмана та фільтри частинок (MCL).

Також ми розглянули модель виявлення та об'їзду перешкод в динамічному складському середовищі. Тут представлені етапи, як робот бачить перешкоди. Як він їх представляє для себе, наприклад, за допомогою локальної карти заповненості. І основні алгоритми, як він планує невеликі маневри для об'їзду (DWA, VFH). Ці алгоритми використовують вартісні функції, щоб вибрати

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпечний та ефективний шлях.

Ще одна важлива модель – це модель обробки сигналів та прийняття рішень для керування операціями. Ми узагальнили, як інформація від датчиків та команди управління проходять кілька рівнів обробки. А також логіку, за якою приймаються рішення на поведінковому рівні. Наприклад, з використанням підходів FSM або дерев поведінки. Це потрібно для координації всіх дій робота. І наостанок, модель роботи механізму підйому/переміщення вантажу. Ми розглянули кінематичні та динамічні аспекти роботи виконавчого механізму, який призначений для взаємодії з вантажем. А також принципи керування ним. Розроблені математичні моделі дозволяють не тільки краще зрозуміти фізику процесів, що відбуваються, коли працює мобільний складський робот. Вони також слугують основою для наступного етапу.

А саме – для комп'ютерного моделювання та симуляції роботи системи. А також для розробки та тестування програм керування у віртуальному середовищі. Перш ніж, можливо, реалізовувати їх на справжньому прототипі.

4. МОДЕЛЮВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР КОМПОНЕНТІВ РОБОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ

4.1. Технічні вимоги та вихідні дані для розробки робота під конкретні складські операції

На основі сформульованих технічних вимог з розділу 1 та аналізу функціональних блоків системи керування з розділу 2, для подальшого моделювання, розрахунків та потенційної реалізації прототипу мобільного складського робота пропонується наступна апаратна конфігурація [1]:

Центральне керування та обробка даних:

- Одноплатний комп'ютер: Raspberry Pi 4 Model B з 4GB RAM – для виконання складних завдань, таких як SLAM, навігація, обробка даних з LiDAR, взаємодія з ROS.
- Мікроконтролерна плата: STM32 (наприклад, STM32F103C8T6 "Blue Pill") – для керування двигунами на низькому рівні, зчитування даних з

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

простих сенсорів (енкодери, IMU, ультразвукові) та взаємодії з Raspberry Pi.

- Карта пам'яті: microSD карта об'єму 64GB для Raspberry Pi.

Навігація та локалізація:

- LiDAR: 2D лазерний сканер RPLIDAR A1M8 (або аналогічний з кутом огляду ~270-360 градусів та дальністю 5-12 метрів).
- Інерційний вимірювальний блок (IMU): Модуль MPU-9250.
- Енкодери: Інкрементальні енкодери, інтегровані в мотор-редуктори ведучих коліс.

Сенсори:

- Ультразвукові датчики відстані: 4-6 шт., HC-SR04 (або аналогічні) для виявлення близьких перешкод по периметру.
- Кнопка аварійної зупинки: 1 шт., стандартна грибоподібна кнопка.

Зв'язок та передача даних:

- Wi-Fi модуль: Вбудований в Raspberry Pi 4, або зовнішній модуль ESP8266/ESP32.

Живлення:

- Акумуляторна батарея: Збірка з Li-ion 18650.
- Система управління батареєю (BMS): Плата BMS для конфігурації з відповідним струмом захисту.
- Зарядний пристрій: Спеціалізований зарядний пристрій для Li-ion акумуляторних збірок.

Приводи та шасі:

- Електродвигуни: 4 шт. Махон ЕС-і 40 (70Вт, 36В, 6450об/хв)

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Колеса: 4 шт.
- Шасі та корпус: Виготовлені з листового матеріалу (алюміній), згідно з розробленою 3D-моделлю.
- Транспортна платформа: Горизонтальна платформа для розміщення контейнера.

4.2. Моделювання навантажень на конструкцію робота під час виконання операцій

Щоб переконатися, що наш мобільний складський робот буде достатньо міцним, ми провели моделювання навантажень. Головна мета – перевірити, чи витримують його основні частини, тобто корпус та транспортна платформа, вагу контейнера з вантажем. Нам важливо знати, чи не буде надмірних деформацій, і чи не зламається щось під час роботи. Цей аналіз ми робили після того, як створили тривимірну модель робота в програмі SolidWorks.

Для перевірки на міцність ми взяли такі ключові частини нашої 3D-моделі, які ми зробили раніше:

- Основний корпус: Це наша головна коробка, в якій вже є вирізи для коліс. Саме цей корпус буде нести на собі все навантаження. Для моделювання він буде зроблений з алюмінієвого сплаву 3.0205 (EN-AW 1200).
- Кришка: Це окрема деталь, яка ставиться зверху на корпус і закриває його. Вона теж може брати на себе частину навантаження, особливо якщо до неї кріпиться платформа для вантажу. Матеріал для кришки ми взяли такий самий, як і для корпусу – 3.0205 (EN-AW 1200).
- Платформа для вантажу: Це ще одна окрема деталь, на яку безпосередньо ставитиметься контейнер. Саме вона першою відчує тиск від вантажу. Для неї також можна розглянути той самий алюмінієвий сплав.
- Інші частини, такі як колеса, мотори, батареї, в цьому аналізі ми розглядаємо в основному як джерела маси. Вони створюють додаткове навантаження на корпус, кришку та платформу.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сам процес моделювання навантажень методом скінченних елементів (МСЕ) починається з того, що ми активуємо спеціальний інструмент в SolidWorks. Для цього в налаштуваннях програми треба знайти і підключити додаток SOLIDWORKS Simulation (як це зробити, показано на рис. Х.Х – *ваш скріншот цього етапу*). Коли цей модуль активний, на панелі інструментів з'являється нова вкладка "Simulation". Саме там ми і створюємо нове дослідження для нашого аналізу

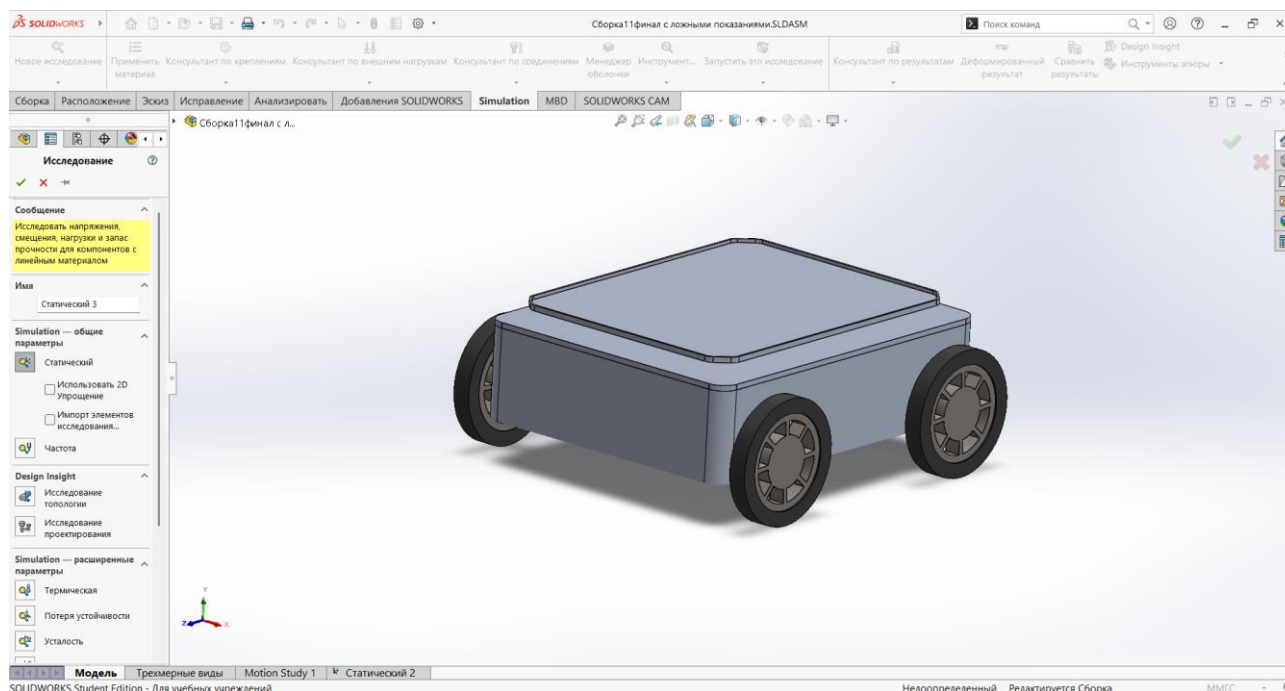


Рис. 4.1 – вікно SOLIDWORKS Simulation

Для нашої задачі найкраще підходить статичний аналіз, бо він дозволяє розрахувати, які внутрішні напруження виникнуть в конструкції, як сильно деталі перемістяться або деформуються під дією постійних навантажень. Це якраз те, що нам потрібно, щоб зрозуміти, чи достатньо міцною є наша розробка.

Наступний дуже важливий крок – це призначення матеріалів усім деталям, які ми аналізуємо. Це було зроблено раніше на етапі моделювання самих деталей. Механічні властивості матеріалу, такі як його модуль пружності чи межа плинності, дуже сильно впливають на те, якими будуть результати розрахунку.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Далі треба визначити, як наша конструкція закріплена у просторі. Це називається заданням граничних умов або закріплень (Fixtures). Наш робот стоїть на колесах. Ми аналізуємо навантаження на корпус, кришку та платформу від вантажу та ваги інших компонентів. Тому для спрощеного аналізу ми можемо зафіксувати ті місця на основному корпусі, де передбачається кріплення колісних осей або блоків. Наприклад, якщо у нас є отвори або спеціальні площадки для кріплення коліс, можна зафіксувати ці поверхні від будь-яких переміщень. Для цього в SolidWorks Simulation є інструмент "Зафіксована геометрія" (Fixed Geometry)

Тепер вказуємо сили, що діють на конструкцію. Головними силами в нашому випадку будуть:

- Сила тяжіння (Gravity): Вона діє на всі частини моделі – корпус, кришку, платформу. В налаштуваннях статичного аналізу ми активуємо опцію "Гравітація" і вказуємо стандартне прискорення вільного падіння $9,81 \text{ м/с}^2$ та його напрямок.
- Навантаження від вантажу: Наш робот має перевозити контейнер масою до 200 кг. Сила, з якою цей вантаж буде тиснути на транспортну платформу, розраховується за відомою формулою:

$$F_{\text{вантаж}} = m_{\text{вантаж}} \cdot g = 200 \text{ кг} \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 = 1962 \text{ Н.}$$

Цю силу ми прикладаємо до верхньої поверхні Платформи для вантажу. Важливо розподілити її по площі, яку приблизно займає основа контейнера. В SolidWorks це можна зробити за допомогою інструмента "Сила" (Force) або "Тиск" (Pressure), прикладеного до відповідної області на цій платформі

Завершивши всю підготовку, запускаємо розрахунок статичного аналізу. Це робиться, клацнувши правою кнопкою миші на назві нашого дослідження в дереві Simulation і вибравши команду "Run" (Виконати).

Програма проведе всі необхідні обчислення.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В результаті розрахунку ми отримаємо кілька кольорових карт, або епюр. Вони допоможуть нам візуально оцінити, як поведеться наша конструкція під дією заданих навантажень:

- Епюра напружень (Stress Plot): Вона показує, як розподіляються внутрішні напруження в матеріалі конструкції. Ми порівнюємо максимальні значення цих напружень з допустимими напруженнями для обраного нами матеріалу. Наприклад, з межею плинності цього матеріалу, поділеною на певний коефіцієнт запасу міцності. Це покаже, чи не почне деталь пластично деформуватися або навіть руйнуватися.

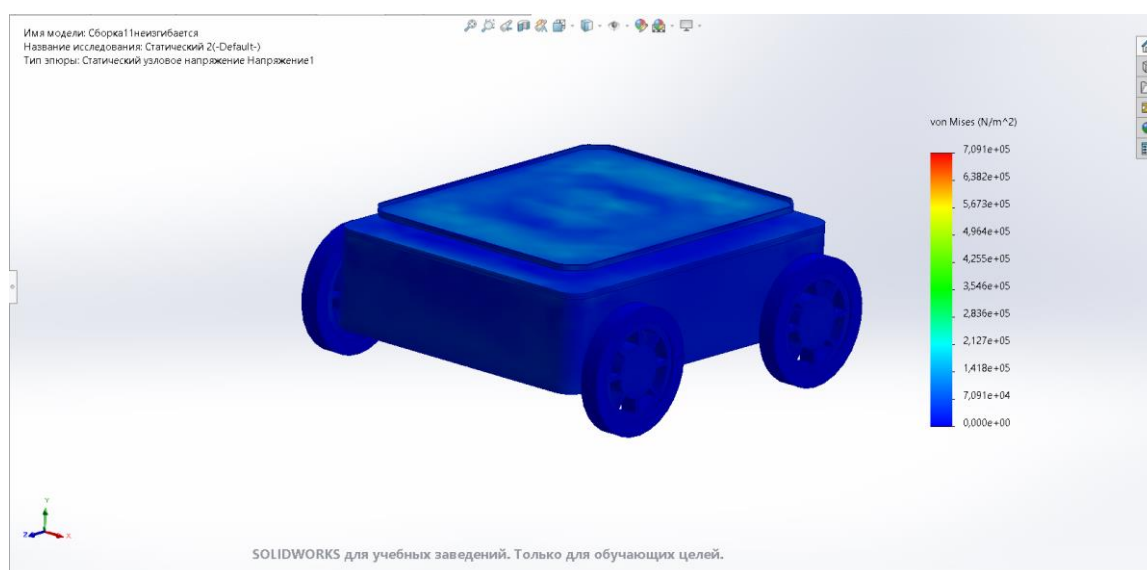


Рис. 4.2 – Епюра напружень

- Епюра переміщень (Displacement Plot): Вона відображає, наскільки сильно змістилися різні точки конструкції під дією навантажень відносно їхнього початкового, ненавантаженого положення. Це допомагає оцінити, наскільки жорсткою є наша конструкція, чи не буде вона занадто сильно прогинатися під вагою вантажу.

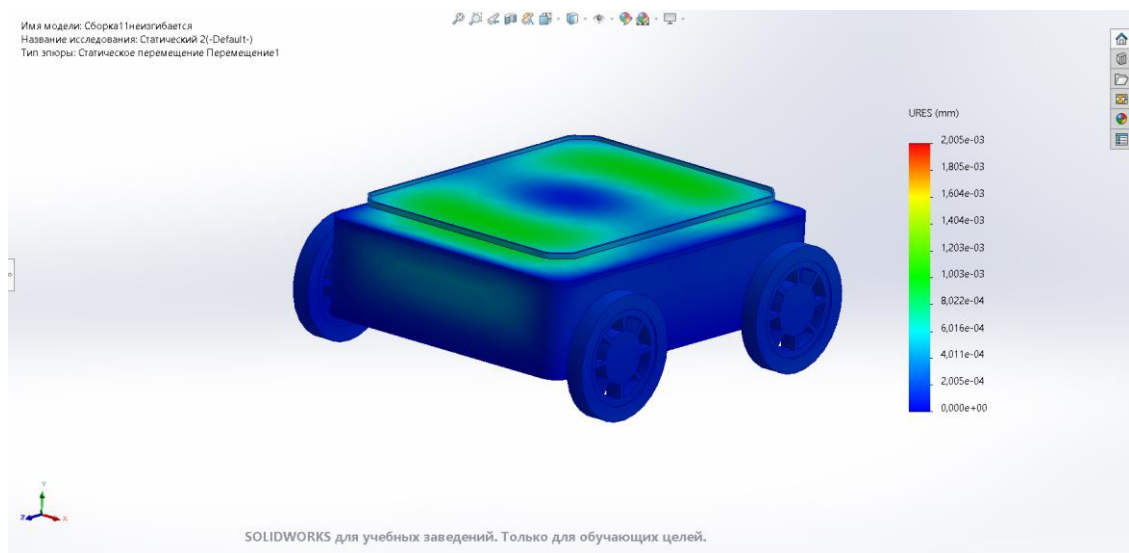


Рис. 4.3 – Епюра переміщень

- Епюра деформацій (Strain Plot або Deformed Shape): Вона наочно показує, як саме змінилася форма всієї конструкції. Часто для кращої візуалізації її показують у збільшеному масштабі, щоб було добре видно, де і як деталь деформується.

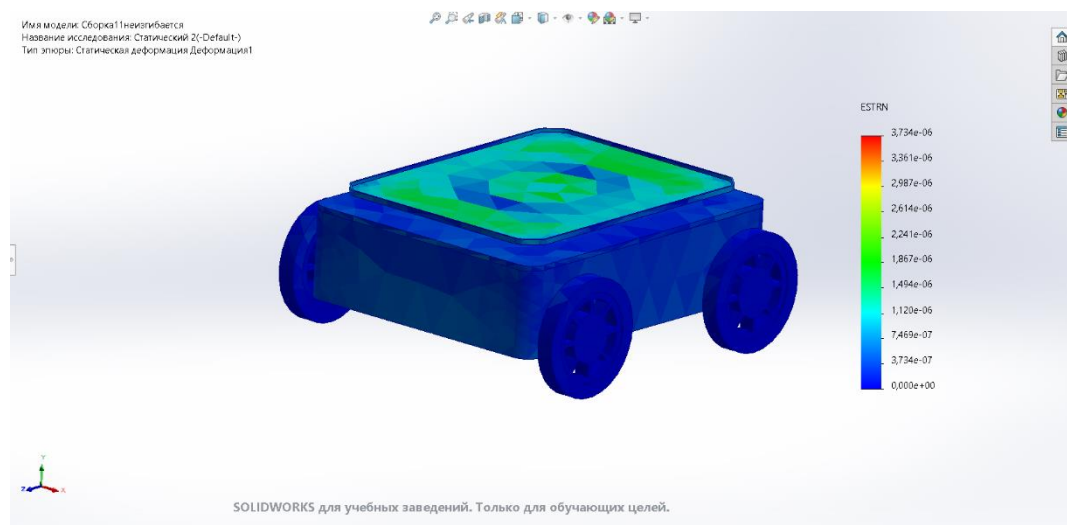


Рис. 4.4 – Епюра деформацій

Кожна така епюра має свою кольорову шкалу. Ця шкала співвідносить колір, яким зафарбована ділянка на моделі, з числовим значенням відповідного параметра.

Аналіз цих епюр дасть нам відповідь на головне питання: чи здатна обрана нами конструкція корпусу, кришки та транспортної платформи нашого складського робота витримувати навантаження від контейнера масою 200 кг?

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Якщо максимальні напруження значно нижчі за допустимі, а переміщення невеликі, то можна вважати, що конструкція спроектована достатньо міцною, якщо ж ми побачимо зони з дуже високими напруженнями або занадто великими переміщеннями, то це чіткий сигнал, що потрібно щось змінювати в конструкції. В нашому випадку моделювання епюр нашого робота для складських приміщень показали достатній результат с запасом міцності конструкції на випадок якщо вантаж буде перевищений.

4.3. Розрахунок та вибір електродвигунів для руху та приводів операційних механізмів

Маса робота разом з вантажем становить:

$$m = m_r + m_g = 80 \text{ кг} + 200 \text{ кг} = 280 \text{ кг} \quad (4.1)$$

Припустимо, що робот рухається зі швидкістю

$$v = 4 \text{ км/год} = \frac{4 \times 1000}{3600} \text{ м/с} = 1,11 \text{ м/с} \quad (4.2)$$

Необхідна потужність для подолання тертя та прискорення оцінюється за формулою:

$$P = F \cdot v, \quad (4.3)$$

де F – сила тертя, v – швидкість.

Сила тертя розраховується за формулою:

$$F = \mu \cdot m \cdot g \quad (4.4)$$

де $\mu = 0.05$ (коефіцієнт тертя), $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ (прискорення вільного падіння).

Підставляємо значення:

$$F = 0,05 \times 280 \text{ кг} \times 9,81 \text{ м/с}^2 = 137,34 \text{ Н} \quad (4.5)$$

Розрахунок потужності:

$$P = 137,34 \text{ Н} \times 1,11 \text{ м/с} = 152,44 \text{ Вт} \quad (4.6)$$

Отже, сумарна потужність усіх двигунів повинна бути не менше:

$$P_{\text{заг}} \geq 152,44 \text{ Вт} \quad (4.7)$$

Для такої суммарної потужності візьмемо двигуни з запасом. Розглянемо такий двигун як Махон ЕС-і 40 (70Вт, 36В, 6450об/хв)

Потужність усіх двигунів:

$$P = 4 \times 70 = 280 \text{ Вт} \quad (4.8)$$

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такої потужності нам вистачить навіть якщо робот буде перевантажений на чималу вагу [3].

4.4. Розрахунок енергоспоживання та вибір акумуляторів для тривалого виконання операцій

Ми будемо використовувати стандартні акумулятори Li-ion 18650. Потрібно порахувати енергії одного такого акумулятора за такою формулою,

$$E = C \cdot V \quad (4.9)$$

де E – енергія одного акумулятора, C – ємність, V – напруга.

Акумулятор Li-ion 18650 має такі характеристики: ємність 2500 мА·год та напругу 3.7V. Звідси маємо такий розрахунок для одного акумулятора

$$E = 2.5 \cdot 3.7 = 9.25 \text{Вт}\cdot\text{год} \quad (4.10)$$

Зараз нам потрібно з'ясувати яка необхідна повна енергія для того щоб робот міг на одній зарядці працювати певний час.

$$E_{\text{необхідна}} = P \cdot t \quad (4.11)$$

де $E_{\text{необхідна}}$ – це енергія яка необхідна для роботи робота, P – споживана потужність робота, t – час роботи.

Нам необхідно щоб робот працював 3 години на одному заряді, звідси маємо розрахунок

$$E_{\text{необхідна}} = 152 \cdot 3 = 456 \text{Вт}\cdot\text{год} \quad (4.12)$$

Коли ми маємо дані про споживану енергію, потрібно порахувати скільки нам потрібно використати акумуляторів за формулою

$$N = \frac{E_{\text{необхідна}}}{E_{\text{одного акумулятора}}} \quad (4.13)$$

де N – це кількість акумуляторів, $E_{\text{необхідна}}$ – потрібна енергія, $E_{\text{одного акумулятора}}$ – енергія одного акумулятора.

Підставляємо значення:

$$N = \frac{456}{9.25} \approx 49.3 \Rightarrow \text{округлюємо} \rightarrow 50 \text{шт.} \quad (4.14)$$

Шляхом обчислення ми отримали кількість в 50 акумуляторів.

Щоб отримати потрібну напругу для двигунів (~24 В), з'єднуємо 7 елементів у серії (7S)

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_{\text{батареї}} = 10 \cdot 3.7 = 37\text{В} \quad (4.15)$$

Потім визначаємо, скільки паралельних рядів потрібно, щоб в сумі було 50 батарейок:

$$\frac{50}{10} = 5 \text{ паралельних гілок}(5P) \quad (4.16)$$

Таблиця 2

Параметр	Значення
Конфігурація	10S5P (10 послідовно, 5 паралельно)
Загальна кількість	50 акумуляторів (10×5)
Напруга блоку	$3.7 \text{ В} \times 10 = 37 \text{ В}$
Ємність блоку	$2.5 \text{ А} \cdot \text{год} \times 5 = 12.5 \text{ А} \cdot \text{год}$
Загальна енергія	$37 \text{ В} \times 12.5 \text{ А} \cdot \text{год} = 462.5 \text{ Вт} \cdot \text{год}$
Споживання системи	152 Вт
Час роботи	$462.5 / 152 \approx 3.04 \text{ год}$

4.5. Симуляція виконання роботом типових складських операцій

Коли ми вже розробили математичні моделі і вибрали основні деталі для нашого робота, настає дуже важливий етап. Треба перевірити, чи буде вся ця система керування працювати так, як ми собі уявляємо. Для цього проводять симуляційне моделювання. Що таке симуляція? Це коли ми відтворюємо поведінку робота, але не в реальному світі, а у віртуальному. Цей віртуальний світ імітує справжні умови складу. Так ми можемо протестувати всі наші

програми: для навігації, для планування шляху, для уникнення перешкод, для виконання завдань. І головне – все це без ризику поламати справжнього робота. А ще це значно економить час та гроші.

Для симуляції ми обрали таку програму, яка добре вмє працювати разом з ROS. ROS – це Robot Operating System, набір інструментів, який ми плануємо використовувати для системи керування нашого робота. Такою програмою є Gazebo Simulator. Gazebo – дуже потужна штука. Вона дозволяє робити багато чого. Наприклад, створювати дуже детальні 3D-моделі самого робота. І віртуального складу, де він буде їздити. Gazebo також вмє імітувати фізику руху робота. Тобто, як він буде їхати, тертися об поверхню, стикатися з чимось.

А ще можна моделювати роботу всіх датчиків: LiDAR, камер, енкодерів, IMU, ультразвукових. Вони будуть генерувати дані, дуже схожі на ті, що давали б справжні датчики. І, звісно, в Gazebo можна запускати та тестувати наші програми на ROS, які відповідають за навігацію, керування рухом та інші важливі функції [21].

Спочатку ми створюємо віртуальну модель нашого робота та складу. Модель робота робиться у спеціальному форматі, який розуміє Gazebo (це URDF або SDF). Вона включає всі його розміри, вагу, як він рухається (у нас диференціальний привід), де розташовані віртуальні датчики та які в них характеристики. Також моделюються мотори коліс. Це потрібно, щоб можна було керувати рухом віртуального робота через програми на ROS. Модель складу – це віртуальний 3D-простір. Він схожий на типовий склад: є стіни, стелажі, проходи, місця для завантаження та розвантаження. Можна додати туди і нерухомі, і навіть прості рухомі перешкоди. Це щоб перевірити, як робот буде їх уникати.

Потім ми все це налаштовуємо і запускаємо симуляцію. Програми системи керування робота (ті самі вузли ROS для SLAM, локалізації, навігації, керування моторами) запускаються. І підключаються до нашого віртуального робота в Gazebo. А щоб бачити, що відбувається, як робот рухається, яку карту

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

він малює, які дані приходять з датчиків, ми використовуємо спеціальний інструмент RViz. Він теж входить до складу ROS і дуже допомагає візуалізувати весь процес.

Далі ми проводимо симуляції за різними сценаріями. Щоб перевірити головні функції робота. Наприклад, як він будує карту. Робот у ручному або автоматичному режимі їздить по віртуальному складу, а система SLAM малює карту приміщення. Ми дивимося, наскільки якісною та точною вийшла карта. Потім перевіряємо, як він орієнтується на вже готовій карті (локалізація). Робот рухається, а система визначає, де він. Ми оцінюємо точність та стабільність. Дуже важливий тест – рух за заданим маршрутом. Роботу дається завдання доїхати з однієї точки в іншу. Навігаційна система ROS планує шлях, а робот їде, намагаючись уникати віртуальних перешкод. Ми дивимося, наскільки точно він тримається маршруту, як ефективно об'їжджає перешкоди, і скільки часу на це йде. І, звісно, моделюємо повний цикл перевезення контейнера: отримав завдання, поїхав до місця завантаження, постояв там трохи (імітуючи завантаження), поїхав до місця розвантаження, знову постояв (імітуючи розвантаження).

Під час симуляції ми збираємо різні дані. Якою траєкторією рухався робот. Скільки часу пішло на виконання завдань. Наскільки точно він позиціонувався. Чи були зіткнення, або скільки разів спрацьовувала система безпеки. А також, наскільки сильно завантажувалися комп'ютерні ресурси. Всі ці дані ми потім уважно аналізуємо. Щоб оцінити, чи добре працюють наші алгоритми. Щоб знайти можливі проблеми. І щоб потім краще налаштувати параметри системи керування.

Симуляційне моделювання – це дуже корисна річ. Воно сильно прискорює розробку та тестування системи керування мобільного робота. Зменшує ризики. І готує програмне забезпечення до того, щоб його можна було, якщо все добре, перенести на справжнього, фізичного робота.

Висновки до розділу 4

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, що ми маємо після четвертого розділу? Тут ми вже не просто міркували, а бралися за конкретні справи: моделювали, рахували і вибирали комплектуючі для нашого мобільного робота. Того самого, що має допомагати на складі. Цей етап був дуже важливим, бо він дозволив нам перейти від суто теоретичних ідей до обґрунтування того, як все це буде виглядати і працювати насправді.

Ми відштовхувалися від технічних вимог, які сформулювали раніше. І на їх основі зробили кілька ключових речей.

По-перше, ми перевірили на міцність конструкцію робота. Змоделювали, які навантаження вона буде відчувати, коли повезе вантаж. Аналіз показав, що наша рама та транспортна платформа витримують. Тобто, спокійно перевозитимуть ящики включно до 200 кілограмів.

По-друге, ми провели розрахунки та підібрали електродвигуни, які будуть крутити колеса. Ми визначили, який саме потрібен крутний момент. І яка швидкість обертання. На основі цих розрахунків обрали конкретний тип двигунів з редукторами та енкодерами. Вони мають забезпечити роботу потрібну швидкість та силу для руху.

По-третє, ми розібралися з «апетитом» робота і вибрали для нього акумулятор. Ми оцінили, скільки енергії будуть споживати всі його системи. І підібрали літій-іонну батарею такої ємності та напруги, щоб робот міг працювати сам по собі не менше двох годин. Як ми й планували.

І по-четверте, ми провели симуляцію. Перевірили, як робот буде виконувати типові складські завдання, але не насправді, а у віртуальному світі Gazebo, використовуючи ROS. Ця комп'ютерна гра дозволила нам протестувати головні алгоритми системи керування. Це і те, як він малює карту (SLAM). І як орієнтується на ній (локалізація). І як планує маршрут. І як уникає перешкод. Все це у віртуальному складі, що дуже зручно для перших тестів [20].

Що ж показали всі ці моделювання та розрахунки? Вони підтвердили, що обрані нами компоненти та розроблені алгоритми відповідають тим технічним вимогам, які ми поставили на самому початку. Зокрема, ми переконалися, що

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навігаційна система може працювати у віртуальному середовищі. І що робот справді здатний виконувати завдання з перевезення контейнерів. Також ми змогли зробити попередню оцінку того, наскільки ефективною може бути автоматизація певних складських операцій за допомогою такого типу мобільного робота, який ми розробляємо. Тобто, робота зроблена не дарма, і є всі підстави рухатися далі.

ВИСНОВКИ

У цій дипломній роботі ми взяли за досить цікаве і, як нам здається, актуальне науково-технічне завдання. Ми намагалися розробити систему керування для мобільного робота. Такого робота, який міг би допомагати автоматизувати операції на складі. Нашою головною метою було не просто придумати якусь ідею, а створити концепцію. І обґрунтувати технічні рішення для такого помічника. Щоб він міг сам, без постійного нагляду людини, виконувати завдання з перевезення вантажів у звичайному складському приміщенні.

Що ж нам вдалося зробити за час цієї роботи? Давайте підсумуємо основні результати.

Спочатку ми провели такий огляд існуючих аналогів. Подивилися, що вже існує у світі в цій галузі. Які є аналоги нашому роботу. Які технології застосовуються для автоматизації складів за допомогою мобільних роботів. Ми проаналізували сучасні підходи до того, як роботи можуть самостійно орієнтуватися в просторі. Як вони планують свої маршрути. А також розглянули різні типи складських роботів, такі як AMR, AGV, та системи GTR. На основі всього цього аналізу ми змогли сформулювати цілий список технічних вимог. До нашого мобільного робота та його системи керування. З прицілом на те, що він буде перевозити невеликі контейнери.

Потім ми взяли за проектування архітектури системи керування нашого мобільного складського робота. Тобто, визначили, з яких ключових функціональних блоків вона буде складатися. Це і блок, що безпосередньо керує рухом та точним позиціонуванням. І блок, що відповідає за навігацію та

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розуміння, де робот знаходиться. І сенсорна система – його «очі та вуха». І блок зв'язку, щоб він міг «спілкуватися». А також механізми для виконання операцій та система живлення, щоб у нього були сили працювати. Для кожного такого блоку ми описали, що він має робити. І запропонували приблизний набір апаратних компонентів. Туди увійшли і одноплатний комп'ютер Raspberry Pi, і мікроконтролер, і 2D LiDAR, і набір різних допоміжних сенсорів, і, звісно, відповідні мотори, приводи та джерела живлення.

Далі ми заглибилися в теорію і створили цілий комплекс математичних моделей. Вони описують, як буде поводитися наш мобільний робот. Та які ключові процеси відбуваються під час його роботи. Ми розглянули кінематичну та динамічну моделі руху робота, коли він везе вантаж.

Модель системи навігації та локалізації, яка базується на ймовірнісних підходах, бо в реальному світі завжди є неточності. Модель виявлення та об'їзду перешкод. Модель обробки сигналів та прийняття рішень. А також модель роботи виконавчих механізмів. Всі ці моделі заклали міцну теоретичну основу для подальшого проектування та комп'ютерної симуляції.

І наостанок, ми перейшли до практики. Провели моделювання, зробили інженерні розрахунки та обґрунтували вибір конкретних компонентів для нашого робота. Ми здійснили моделювання навантажень на конструкцію, щоб переконатися, що вона витримає. Воно підтвердило її міцність. Ми виконали розрахунки та обрали електродвигуни та акумуляторну батарею. Вони відповідають тим вимогам, які ми поставили щодо швидкості руху та часу автономної роботи. Ми також провели симуляційне моделювання того, як робот буде виконувати типові складські операції. Робили це у віртуальному середовищі Gazebo/ROS. І це моделювання продемонструвало, що запропоновані нами алгоритми навігації та керування цілком працездатні.

Список джерел

1. Поліщук М.М., Ткач М.М. (2023). Робототехнічні системи та комплекси: мобільні роботи довільної орієнтації.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

2. Поліщук М.М., Ткач М.М. (2021). Робототехнічні системи: проектування і моделювання.
3. Ткачук А.Г. (2023). Концепція підбору двигунів мобільної роботизованої платформи із автономною системою стабілізації.
4. Невлюдов І., Новоселов С., Сухачов К. (2023). Метод одночасної локалізації та картографування для побудови 2,5D-карти навколишнього середовища засобами ROS.
5. Харчук В., Ткаченко С. (2025). Прогнозування руху роботизованої мобільної платформи.
6. Петренко Д.В., Протасов А.Г. (2024). Огляд сучасних технологій підвищення автономності мобільних колісних роботів.
7. Невлюдов І.Ш., Андрусевич А.О., Євсєєв В.В. (2022). Проектування мобільних маніпуляційних роботів.
8. Сорокін М.С. (2024). Основи робототехніки: курс лекцій.
9. Артюх О.М. (2021). Основи мехатроніки.
10. Гармаш О.М., Овдієнко О.В. (2023). Складська логістика: Навчальний посібник.
11. Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). Introduction to Autonomous Mobile Robots.
12. Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). Probabilistic Robotics.
13. Fragapane, G., de Koster, R., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: A systematic literature review.

					ДПБ.ПМ-11.17.1760.00.000.ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 14.Kousi, N., Gkournelos, C., Foivos, P. S., & Doulgeri, Z. (2021). A Survey on Navigation Techniques for Mobile Robots and AGVs in Logistics Applications.
- 15.Wurman, P. R., D'Andrea, R., & Mountz, M. (2008). Coordinating hundreds of cooperative, autonomous mobile robots in a warehouse.
- 16.Hess, W., Kohler, D., Rapp, H., & Andor, D. (2016). Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM.
- 17.Quigley, M., et al. (2009). ROS: an open-source Robot Operating System.
- 18.Craig, J. J. (2005). Introduction to Robotics: Mechanics and Control (3rd ed.).
- 19.LaValle, S. M. (2006). Planning Algorithms. Cambridge University Press.
- 20.ROS Navigation Stack Documentation. [Online]. Available:
<http://wiki.ros.org/navigation>
- 21.Gazebo Simulator Documentation. [Online]. Available:
<http://gazebo.org/docs>

