

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет «Автоматики і комп'ютеризованих технологій»  
(повна назва)

Кафедра «Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та  
робототехніки»  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
«Розроблення системи автоматизації транспортування товару на складі»  
(тема)

Виконала:  
здобувачка 4 року навчання,  
групи АКТСІ-21-1  
Анна ШЕВЧЕНКО  
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та  
комп'ютерно інтегровані технології  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Софія ХРУСТАЛЬОВА  
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Ігор НЕВЛЮДОВ  
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Шевченко Анна Андріївна, як здобувачка вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовувала штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

9 червня 2025 р.



Анна ШЕВЧЕНКО

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ «Автоматики і комп'ютеризованих технологій»

Кафедра \_\_\_\_\_ «Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки»

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

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

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

Освітня програма \_\_\_\_\_ «Системна інженерія»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 25 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві \_\_\_\_\_ Шевченко Анні Андріївні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення системи автоматизації транспортування товару на складі»

Затверджена наказом університету від 19 травня 2025 р. № 391 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 24 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Дані про існуючі технології автоматизації складських приміщень; дані про різні види складських роботів та їх технічні характеристики; дані про існуючі системи управління складськими приміщеннями; середовища розробки Visual Studio, Wokwi, Tinkercad; мова програмування C++.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Огляд і аналіз існуючих методів, засобів та технологій автоматизації складських приміщень; Розроблення структурної схеми та алгоритму роботи системи автоматизації транспортування товару на складі; Вибір технічних компонентів системи; Оцінка стійкості системи; Розроблення системи автоматизації транспортування товару на складі.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Графічний матеріал у вигляді презентації формату pptx в форматі 12 с.

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

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання до кваліфікаційної роботи	28.04.2025	виконано
2	Написання вступу	30.04-05.05.2025	виконано
3	Огляд і аналіз існуючих методів, засобів та технологій автоматизації складських	06.05-10.05.2025	виконано
4	Розроблення структурної схеми та алгоритму роботи системи автоматизації	11.05-18.05.2025	виконано
5	Розроблення системи автоматизації транспортування товару на складі	19.05-01.06.2025	виконано
6	Охорона праці	01.06-02.06.2025	виконано
7	Висновки	02.06-03.06.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	03.06-07.06.2025	виконано
9	Подання роботи на нормоконтроль	09.06.2025	виконано
10	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	10.06-11.06.2025	виконано
11	Подання роботи на рецензію	13.06.2025	виконано
12	Подання роботи на підпис зав. кафедри	13.06.2025	виконано
13	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	17.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 28 квітня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_ Анна ШЕВЧЕНКО  
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. Софія ХРУСТАЛЬОВА  
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 57 с., 1 табл., 17 рис., 6 дод., 22 джерела.

### СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ, ТРАНСПОРТУВАННЯ, СКЛАД, ВІРТУАЛЬНИЙ МАКЕТ, РОБОТ.

Об'єктом розробки є процес транспортування побутових товарів на складі.

Предметом розробки є віртуальний макет системи автоматизації транспортування побутових товарів на складі електронної комерції.

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності процесу транспортування товару на складі електронної комерції з продажу побутових товарів.

В ході роботи було проаналізовано існуючі методи, засоби та технології автоматизації складських приміщень; розроблено структурну схему та алгоритм роботи системи автоматизації транспортування товару на складі; обрано технічні компоненти системи, середовище та мову програмування для реалізації віртуального макету системи; розроблено технічну складову моделі складського робота та віртуальний макет системи автоматизації транспортування товару на складі.

Результатом роботи є система автоматизації транспортування товару на складі, яку реалізовано у вигляді віртуального макету і технічної складової моделі складського робота.

Також отримані результати відповідають переліку Цілей сталого розвитку, зокрема Цілі 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура» ( п. 9.1 та 9.4).

## THE ABSTRACT

Explanatory note: 57 p., 1 table, 17 fig., 6 add., 22 sources.

AUTOMATION SYSTEM, TRANSPORTATION, WAREHOUSE, VIRTUAL MODEL, ROBOT.

The object of development is the process of transporting household goods in a warehouse.

The subject of development is a virtual model of an automation system for transporting household goods in an e-commerce warehouse.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the process of transporting goods in an e-commerce warehouse for the sale of household goods.

During the work, existing methods, tools and technologies for automating warehouses were analyzed; a structural diagram and an algorithm for the operation of the system for automating the transportation of goods in a warehouse were developed; technical components of the system, an environment and a programming language were selected for the implementation of a virtual model of the system; the technical component of the warehouse robot model has been developed; a virtual mock-up of the warehouse transportation automation system has been developed.

The result of the work is a warehouse transportation automation system implemented in the form of a virtual mock-up and a technical component of the warehouse robot model.

The results obtained also correspond to the list of Sustainable Development Goals, in particular Goal 9 «Industry, Innovation and Infrastructure» (p. 9.1 and 9.4).

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	9
Вступ.....	10
1 Огляд і аналіз існуючих методів, засобів та технологій автоматизації складських приміщень.....	12
1.1 Огляд існуючих технологій у складській логістиці.....	12
1.2 Аналіз існуючих методів, засобів та технологій автоматизації складських приміщень у сфері електронної комерції.....	21
2 Розроблення структурної схеми та алгоритму роботи системи автоматизації транспортування товару на складі.....	27
2.1 Розроблення структурної схеми системи.....	27
2.2 Вибір технічних компонентів системи.....	29
2.3 Розроблення алгоритму роботи системи.....	33
2.4 Оцінка стійкості системи.....	34
3 Розроблення системи автоматизації транспортування товару на складі.....	40
3.1 Вибір середовища та мови програмування для розроблення системи у вигляді віртуального макету.....	40
3.2 Розроблення технічної складової складського робота.....	41
3.3 Розроблення системи у вигляді віртуального макету.....	45
3.3.1 Створення візуальних об'єктів у середовищі OpenGL.....	45
3.3.2 Розроблення логіки функціонування системи.....	49
4 Охорона праці.....	52
Висновки.....	54
Перелік джерел посилання.....	55
Додаток А Апробація результатів роботи.....	58
Додаток Б Код програми для технічної моделі складського робота у середовищі Tinkercad.....	61

Додаток В Код програми для технічної моделі складського робота у середовищі Wokwi.....	68
Додаток Г Код головної форми (MyForm.h) віртуального макету системи у Visual Studio.....	73
Додаток Д Код додаткової форми (MyForm1.h).....	225
Додаток Е Демонстраційний матеріал.....	230

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КІТАР – Кафедра комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

KPI – ключові показники ефективності

НАССР – Hazard Analysis and Critical Control Points

ПЗ – програмний засіб

ХНУРЕ – Харківський національний університет радіоелектроніки

ЧПУ – Числове програмне управління

AGV – Automated Guided Vehicles

AMR – Autonomous Mobile Robot

API – Application Programming Interface

AS/RS – Automated Storage and Retrieval Systems

ERP – Enterprise Resource Planning

FIFO – First In / First Out

G2P – Goods-to-Person

HTTP – Hypertext Transfer Protocol

LED – Light Emitting Diode

LiDAR – Light Detection and Ranging

OCI – Oracle Cloud Infrastructure

RCS – Robot Control System

REST – Representational State Transfer

RFID – Radio Frequency Identification

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

SCM – Supply Chain Management

SLAM – Simultaneous Localization and Mapping

WMS – Warehouse Management System

## ВСТУП

У нинішніх умовах розвитку електронної комерції впровадження автоматизованих рішень у логістичних центрах набуває все більшої ваги для бізнесу, підприємців, а також державних та міжнародних структур. За деякою аналітикою, окремі логістичні комплекси щодня обробляють понад 10000 одиниць товару, при цьому співробітники долають від 12 км до 20 км за зміну. У зв'язку з цим, досягнення максимальної точності та швидкості виконання завдань у таких умовах інтенсивної роботи є вкрай складним, що підвищує ризик помилок через людський фактор. Відповідно, як закордонні, так і вітчизняні компанії повинні усвідомити, що інноваційні технології є ключовим важелем для підвищення конкурентоспроможності та оптимізації логістичних процесів. Для досягнення ефективної та злагодженої роботи впроваджених технологій необхідні комплексні системи автоматизації складських операцій, а перед їхнім запуском критично важливо візуалізувати їхню роботу для повного розуміння всіх етапів.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу транспортування товару на складі електронної комерції з продажу побутових товарів.

Об'єкт розробки – процес транспортування побутових товарів на складі.

Предмет розробки – віртуальний макет системи автоматизації транспортування побутових товарів на складі електронної комерції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести огляд і аналіз існуючих методів, засобів та технологій автоматизації складських приміщень;
- розробити структурну схему та алгоритм роботи системи автоматизації транспортування товару на складі;
- обрати технічні компоненти системи автоматизації транспортування товару на складі;

- обрати середовище та мову програмування для реалізації віртуального макету системи автоматизації транспортування товару на складі;
- розробити технічну складову моделі складського робота;
- розробити систему автоматизації транспортування товару на складі у вигляді віртуального макету;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» [2].

# 1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ, ЗАСОБІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

## 1.1 Огляд існуючих технологій у складській логістиці

Накопичення та обробка товарів є невід'ємними складовими логістичного циклу. Сучасний склад є комплексною інженерною спорудою, що об'єднує численні взаємодіючі елементи, має чітко визначену організаційну структуру та виконує низку функцій, пов'язаних з перетворенням матеріальних потоків, накопиченням, обробкою та розподілом вантажів серед кінцевих споживачів. Існуючі типи складів значно відрізняються за розміром, рівнем технічної оснащеності, специфікою збережених товарів, вартістю їхнього утримання, а також характером інформації, що надходить до управлінського персоналу.

У фармацевтичній галузі до складських приміщень висуваються надзвичайно жорсткі вимоги, оскільки кожен медикамент повинен зберігатися в суворо визначених умовах. Необхідно підтримувати задані температурні режими та показники вологості, щоб запобігти негативному впливу на активні компоненти та готові лікарські засоби. Це безпосередньо впливає на безпеку та здоров'я людей, які вживають ці препарати. Висота стель у таких складських приміщеннях зазвичай становить не менше 9 метрів, що дозволяє розміщувати продукцію на чотирьох ярусах, максимально ефективно використовуючи об'єм будівлі. Мінімальні площі фармацевтичних складів починаються від 800-1000 м<sup>2</sup>, тоді як у провідних дистриб'юторів ліків вони можуть перевищувати 14000 м<sup>2</sup> (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Склад фармацевтичного дистриб'ютора

Відповідно до європейських стандартів, фармацевтичний склад повинен бути оснащений такими обов'язковими компонентами: ефективна система вентиляції та клімат-контролю; безпилкове наливне покриття підлоги; стіни, стелі та підлога, оздоблені матеріалами, стійкими до дії дезінфікуючих засобів; гігієнічні опалювальні панелі; холодильні камери для препаратів, що вимагають зберігання при температурі від  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; сучасне протипожежне обладнання; електронна система контролю доступу до всіх зон приміщення; програмне забезпечення класу WMS для управління складськими процесами, яке відстежує дії персоналу та запобігає помилкам під час обробки замовлень; а також автоматизовані транспортні системи для оперативної обробки продукції, збору та видачі товарів.

На подібних складах активно використовуються розробки компанії KAPELOU, зокрема модульні автоматизовані транспортувальні системи. Вони доступні в різних конфігураціях: горизонтальні, вертикальні або похилі, з приводом або без, роликові або стрічкові [4].

Вертикальні конвеєри для контейнерів переміщують вантажі по вертикалі, при цьому автоматизована система забезпечує точне позиціонування платформи,

плавне завантаження та розвантаження, що запобігає пошкодженню упаковок та деформації продукції (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Вертикальний конвеєр для ящиків

Привідний роликотий транспортер для контейнерів, відомий як рольганг, є універсальною та надзвичайно гнучкою модульною платформою, яка відкриває нові можливості для значного прискорення обробки вантажів, сприяючи підвищенню загальної продуктивності складського комплексу. Його основне призначення полягає у забезпеченні безперебійного переміщення різноманітних вантажів, зокрема пакунків та ящиків, між різними функціональними зонами складу. Це, в свою чергу, дозволяє повноцінно реалізувати концепцію «товар до оператора», мінімізувати час, необхідний для виконання замовлень.

Стрічковий конвеєр є невід’ємним «сполучником» між виробничими підрозділами та складським приміщенням, забезпечуючи ефективне транспортування дрібних вантажів, контейнерів та гнучкої упаковки навіть між різними рівнями будівель (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Стрічковий конвеєр

Варто зазначити, що провідні компанії, такі як KAPELOU, активно впроваджують інноваційні конвеєрні рішення, які базуються на передових технологіях. Зокрема, вони тісно співпрацюють з німецьким виробником МЕТА, що спеціалізується на розробці та впровадженні систем коробкової гравітаційної подачі. Ці унікальні конструкції є спеціалізованими стелажми, полиці яких оснащені високоякісними роликами та встановлені під оптимальним кутом нахилу, що зазвичай коливається в межах 4-6°. Принцип їх функціонування досить простий, але водночас дуже кмітливий: один бік полиці призначений виключно для завантаження нових товарів, тоді як інший – для їх оперативного відбору. Така організація простору дозволяє раціонально використовувати складську площу та значно прискорює процес комплектації замовлень. Завдяки власній масі, вантажі самостійно переміщуються до краю полиці, залишаючись у зоні легкого доступу до операторів.

Також фармацевтична індустрія активно використовує автоматизовані системи зберігання та відбору – AS/RS (рис. 1.4). Ці системи часто обладнані механізмами контролю мікроклімату, є надзвичайно важливими для забезпечення надійного, точного та безпечного зберігання препаратів, які

потребують специфічних умов утримання. Системи AS/RS з інтегрованим контролем довкілля дозволяють створювати стабільні умови зберігання, здійснюючи при цьому безперервний моніторинг усіх параметрів у режимі реального часу.

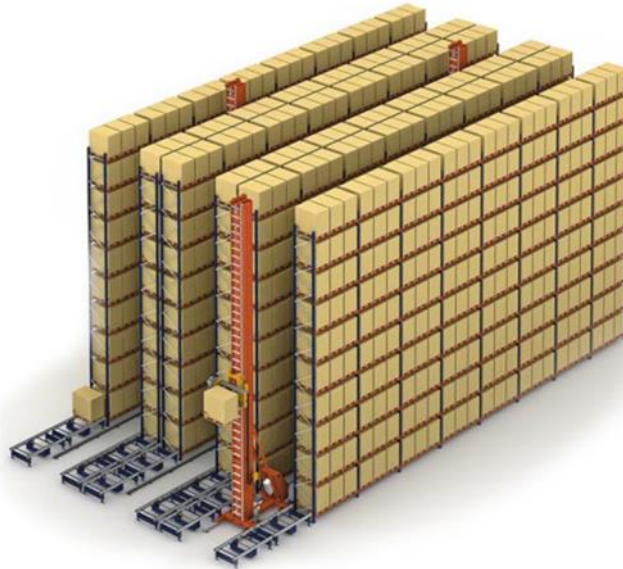


Рисунок 1.4 – Системи AS/RS для палетного зберігання

Типовий комплекс AS/RS у фармацевтиці включає спеціалізовані охолоджувальні або морозильні камери, які оснащені розподіленими датчиками температури та вологості. Ці датчики здатні підтримувати надзвичайно точний температурний режим – від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що є критично важливим для зберігання вакцин, біопрепаратів та інших чутливих до умов медичних засобів. Інтеграція AS/RS з системами моніторингу дозволяє автоматично фіксувати всі показники навколишнього середовища та оперативно передавати їх до WMS – програмного забезпечення для управління складом. У разі будь-якого відхилення від встановлених норм, система негайно сповіщає персонал або автоматично активує резервні сценарії дій, наприклад, перемикає на резервне охолодження або навіть перевантаження товару для запобігання псуванню.

З конструктивної точки зору, такі системи складаються з високотехнологічних висотних автоматизованих стелажних конструкцій,

роботизованих кранів-штаблерів або шатлових механізмів, які ефективно виконують функції зберігання та видачу товарів. Ці комплекси здатні функціонувати безперервно, що значно зменшує потребу в безпосередній участі персоналу. У таких системах активно використовуються сучасні методи ідентифікації, такі як RFID-мітки, QR-коди або Data Matrix-коди, що дозволяє забезпечити точне відстеження кожної одиниці продукції та вести повний, детальний лог її зберігання від моменту надходження до відправки.

Серед головних переваг AS/RS варто виділити можливість повної простежуваності товарів та автоматичне формування звітності. Це особливо актуально при аудитах з боку регуляторних структур. Вся інформація зберігається в електронному вигляді, що гарантує швидкий доступ до даних, знижує ймовірність помилок та мінімізує вплив людського чинника на процеси.

Провідні світові виробники подібних рішень, такі як Dematic, Swisslog, Honeywell Intelligrated, пропонують комплексні системи з терморегуляцією, які вже успішно застосовуються у логістичних центрах фармацевтичних гігантів [8]. Практика переконливо доводить, що ці технології ефективно функціонують як на масштабних фармацевтичних складах, так і в компактних логістичних комплексах з підвищеними вимогами до умов зберігання.

У сфері харчової промисловості, де оперативна обробка продукції з обмеженим терміном споживання є ключовим аспектом, складські автоматизовані системи відіграють надзвичайно важливу роль. Ця галузь характеризується жорсткими стандартами щодо умов зберігання, якості продукції та відстеження партій. Тому автоматизація не тільки підвищує продуктивність, але й гарантує належний рівень безпеки та відповідність санітарним нормам.

Ключовою вимогою до складів харчових продуктів є суворе дотримання точного температурного режиму. Харчову вироби мають різні умови зберігання: від охолоджених (від 0 до +5 °C) та заморожених (нижче -20 °C) до сухих (+15...+25 °C). Для забезпечення цих умов також використовуються AS/RS у камерах із контрольованим мікрокліматом [9]. Додатково впроваджуються

системи моніторингу вологості, рівня CO<sub>2</sub> та вентиляції, які безперервно передають дані до WMS, забезпечуючи постійний та точний контроль за всіма параметрами умов зберігання.

У динамічній та надзвичайно вимогливій сфері харчової логістики дуже важливим є неухильне дотримання принципу FIFO («перший прийшов – перший вийшов»). Цей підхід передбачає, що продукція з найменшим залишковим терміном придатності повинна бути відправлена зі складу до магазину у пріоритетному порядку. Така стратегія є абсолютно критичною при роботі зі швидкопсувними товарами, де кожен день прострочення може призвести до значних фінансових втрат та репутаційних ризиків.

Для успішної реалізації цього принципу сучасні логістичні центри активно використовують передові технологічні рішення. Це включає в себе гравітаційні стелажні системи, які завдяки силі тяжіння забезпечують природне переміщення товарів, а також автоматизовані шатли та роботизовані комплекси. Ці системи розміщують продукцію таким чином, що гарантується її постійна ротація: товари з найранішими датами виробництва або термінами придатності завжди виходять першими. Ключовим елементом цього процесу є всебічне маркування продукції за допомогою QR-кодів, а також автоматичне надходження всієї інформації до централізованої облікової системи. Це дозволяє значно мінімізувати втрати від псування, забезпечити миттєву реакцію на зміни споживчого попиту та оперативно здійснювати відкликання певної партії у разі виникнення проблем.

Для ефективного переміщення продукції між різними функціональними зонами складу – від охолоджених камер до пакувальних ділянок та зон відвантаження – використовуються такі технології як автоматизовані керовані транспортні засоби (AGV). Ці роботизовані рішення фактично замінюють традиційні навантажувачі, забезпечуючи гнучке, безпечне та значно швидше транспортування вантажів. Наприклад, у цехах з виробництва м'ясної продукції AGV може без жодної участі персоналу переміщувати контейнери між холодильною зоною та ділянкою вакуумного пакування. Це не тільки прискорює

процес, але й суттєво знижує потенційний ризик забруднення продукції, що є критично важливим для харчової безпеки [10].

Сучасні склади харчової промисловості інтегровані на рівні програмного забезпечення. Системи управління складом тісно пов'язані з корпоративними ERP-рішеннями, такими як популярний в Україні 1С. Така інтеграція дозволяє отримувати вичерпну та актуальну інформацію про всі наявні запаси, терміни зберігання та навіть здійснювати точне прогнозування майбутніх потреб. Завдяки всебічній автоматизації, формується оперативна та детальна аналітика: коли, за яких умов та ким була оброблена кожна одиниця продукції, чи виникли випадки прострочення. У разі потреби, доступ до цієї інформації здійснюється миттєво, що дозволяє швидко реагувати на будь-які нештатні ситуації. Важливим і обов'язковим компонентом таких інтегрованих систем є механізми НАССР-контролю, які необхідні для сертифікації харчових складів та підтвердження їх відповідності міжнародним стандартам безпеки.

Враховуючи надзвичайно суворі гігієнічні стандарти, що діють у харчовій галузі, автоматизоване обладнання проектується з особливою увагою до можливості легкого очищення та дезінфекції. Для цього використовуються високоякісні нержавіючі матеріали та розробляються герметичні конструкції, що мінімізують ризик накопичення забруднень. У деяких провідних компаніях додатково застосовують передові методи стерилізації, такі як озонування або обробка ультрафіолетом у середині камер, що забезпечує найвищий рівень чистоти.

Яскравим прикладом успішної цифрової трансформації у логістиці є досвід компанії Danone. У їхньому Мадридському логістичному центрі впроваджено систему Easy WMS від Mecalux, яка забезпечує повний контроль запасів та значно оптимізує процеси формування замовлень. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню ефективності обслуговування клієнтів та загальної продуктивності складу. Крім того, Danone інтегрувала модулі Multi Carrier Shipping та Supply Chain Analytics для всебічного відстеження ланцюга постачань та глибокого аналізу всіх логістичних процесів.

Автоматизація складів на підприємствах, які виробляють великогабаритну продукцію, як-от сільськогосподарська техніка, автомобілі, важке обладнання чи побутова техніка, має низку специфічних особливостей, що зумовлені значними масо-габаритними характеристиками товарів. Основними завданнями автоматизації у цій сфері є суттєве скорочення часу виконання замовлень, зниження витрат на ручну працю, покращення системи відстеження компонентів та готової продукції, а також забезпечення безпечного зберігання та транспортування важких елементів.

Оскільки стандартні конвеєри не здатні транспортувати великогабаритні вироби, використовуються спеціалізовані та надзвичайно потужні технічні засоби. До них належать роботизовані кранові системи, порталні роботи, мостові крани з числовим програмним керуванням (ЧПУ) та потужні маніпулятори. Ці складні системи інтегруються у виробничо-логістичні цикли не лише для транспортування, але й для високоточного позиціонування. Наприклад, у виробництві авіаційних або енергетичних двигунів, де навіть незначна похибка може мати критичні наслідки, маніпулятори працюють з вражаючою точністю до  $\pm 0,5$  мм. Ця точність досягається завдяки застосуванню передових технологій, таких як SCADA, лазерне наведення, інерційні сенсори та контроль у реальному часі.

На підприємствах компанії General Electric у сегменті Gas Power та Aviation подібні крани та маніпулятори виконують надзвичайно точні та складні маніпуляції з великими елементами – від обмоток генераторів до частин турбін. Підйомні системи, розроблені у співпраці з провідними компаніями, такими як Konecranes або Demag, здатні одночасно переміщувати вантажі вагою понад 40 тонн, координуючи дії з кількох точок (рис. 1.5). Усі ці компоненти синхронізовані у цифровій системі управління, яка автоматично визначає положення кожного крана, запобігає зіткненням, самостійно балансує навантаження та оптимізує маршрути руху. Більше того, ці рішення оснащені штучним інтелектом, що дозволяє системам розпізнавати форму та розмір об'єкта та адаптувати свої дії без ручного переналаштування – зміни вносяться

через інтуїтивно зрозумілий операторський інтерфейс або активуються заздалегідь заданими алгоритмами.



Рисунок 1.5 – Мостові крани вантажопідйомністю 30 тон

Отже, можна побачити, що залежно від галузі спеціалізації складських приміщень, використовуються дуже різні технології та засоби, задля досягнення більшої автоматизації та ефективності роботи складу, що зараз є дуже важливим критерієм на ринку.

## 1.2 Аналіз існуючих методів, засобів та технологій автоматизації складських приміщень у сфері електронної комерції

У даній роботі пропонується розглянути автоматизацію складського приміщення для середнього бізнесу із продажу побутових товарів в інтернет-магазині. Автоматизація складських процесів у сфері онлайн-торгівлі стала вирішальним елементом для задоволення очікувань сучасних клієнтів – швидка обробка замовлень, точне відстеження продукції та гнучкі варіанти доставки.

Оскільки щодня через такі склади проходить величезна кількість дрібних замовлень, основним завданням автоматизації є забезпечення високої швидкості, можливості масштабування і точності виконання всіх операцій [12].

Одними із найпоширеніших сучасних технологій автоматизації складської логістики є роботи AMR (Autonomous Mobile Robot) (рис. 1.6). Автономний мобільний робот – це інтелектуальний робот, здатний самостійно орієнтуватися та виконувати різноманітні функції без втручання оператора. На відміну від класичних автоматизованих транспортних засобів (AGV), які потребують чітко заданих маршрутів або зовнішніх навігаційних засобів, AMR застосовують сучасні сенсорні системи, алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу обстановки і адаптивного переміщення в просторі. Завдяки цьому робот може оперативно реагувати на зміни середовища, обходити несподівані перепони та ефективно коригувати свій маршрут у режимі реального часу [13].

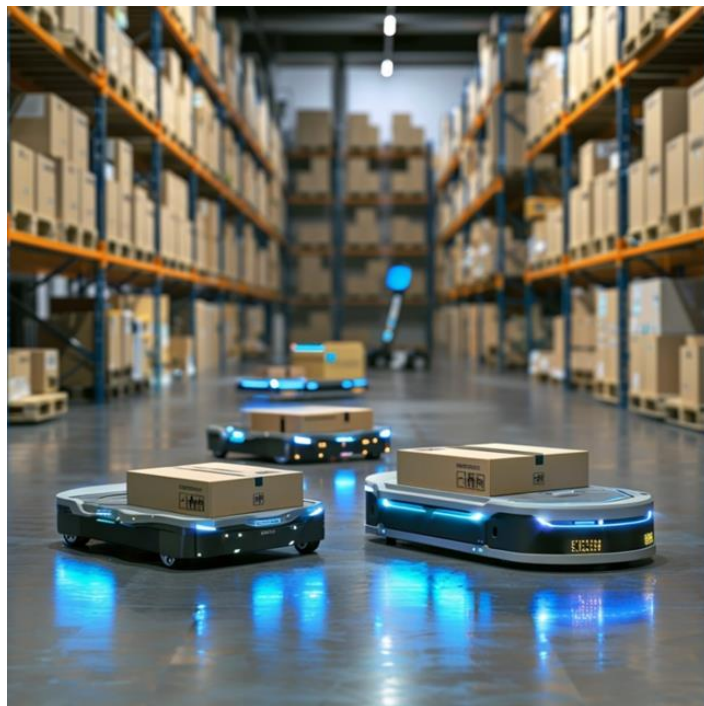


Рисунок 1.6 – Роботи AMR у складському приміщенні

Такі роботи оснащуються різноманітними сенсорами, зокрема LiDAR-сканерами, відеокамерами та ультразвуковими датчиками, навігаційними

системами, що базуються на технології SLAM – Simultaneous Localization and Mapping. Ця технологія дозволяє роботу одночасно створювати карту навколишнього середовища та визначати своє точне місцезнаходження в ньому в режимі реального часу. Завдяки цим алгоритмам AMR формує цифрову модель простору, використовує різні сенсори для сканування обстановки та може змінювати маршрут без потреби у заздалегідь встановленій інфраструктурі [15]. Всі ці вбудовані технології дозволяють їм формувати комплексне сприйняття простору навколо. Вся зібрана інформація обробляється програмним забезпеченням, яке забезпечує прийняття рішень «на ходу».

Існує кілька різновидів AMR, розроблених для конкретних завдань та сценаріїв експлуатації. Найпоширеніші типи включають:

- транспортні платформи (роботи-візки), які призначені для переміщення товарів у складських або виробничих зонах. Ці роботи зазвичай мають низький профіль і оснащені рівною поверхнею або корзиною для вантажу, що робить їх зручними для транспортування малих і середніх обсягів продукції на обмежених відстанях;

- роботи для роботи з поличними системами використовуються в логістичних центрах електронної комерції. Вони можуть рухатись вузькими проходами між стелажми, здійснювати підбір товарів і доставляти їх до станцій пакування, що значно підвищує швидкість виконання замовлень;

- буксирвальні роботи це спеціалізовані пристрої для транспортування важких вантажів, зокрема візків або причепів із матеріалами. Їх часто застосовують на виробничих лініях для переміщення сировини або готової продукції між окремими технологічними ділянками.

Системи комунікації та обміну інформацією, що використовуються в автономних мобільних роботах, відіграють ключову роль у забезпеченні їхньої продуктивної роботи та оперативного реагування на події в реальному часі. По-перше, завдяки сучасним засобам зв'язку, AMR можуть миттєво передавати інформацію про свій стан під час виконання завдань. Це дозволяє центральному контролеру відстежувати активність кожного робота, здійснювати ефективне

керування процесами та приймати обґрунтовані рішення для оптимізації операцій. По-друге, системи передачі даних в AMR підтримують швидкий обмін великими обсягами інформації, що дає змогу здійснювати обробку і аналіз отриманих даних без затримок. Завдяки цьому забезпечується більш ефективно управління виробничими та логістичними процесами, що позитивно впливає на загальну продуктивність підприємства.

Окрім цього, завдяки розвинутим каналам зв'язку, автономні мобільні роботи здатні працювати спільно – координуючи дії між собою, обмінюючись інформацією про навколишнє середовище та розподіляючи завдання.

Для ефективної роботи складу в цілому часто підприємства звертаються до систем, які будуть автоматизувати роботу на багатьох етапах всього складу. Однією з таких систем є WMS-система. Warehouse Management System – це високо функціональне програмне забезпечення, розроблене для повної автоматизації складських процесів і забезпечення зручного управління всіма логістичними операціями. Завдяки їй можливо досягти оптимального використання простору, раціонально організувати зберігання продукції та налагодити ефективний рух внутрішнього транспорту. За допомогою WMS співробітники мають інформацію щодо місцезнаходження кожної одиниці товару, що дозволяє уникати зайвих витрат часу на пошуки та значно скорочує тривалість кожної операції [16].

Якісна система управління складом дозволяє повністю впорядкувати всі етапи – від приймання товару до його відвантаження. Таке ПЗ автоматизує й контролює:

- процес розвантаження та розміщення вантажів;
- збирання замовлень, пакування і відправлення;
- визначення потреби у поповненні запасів;
- логістику та розташування продукції на складі;
- контроль безпеки та інші операційні аспекти.

Класифікація за типом розгортання: локальні (автономні), які зберігають усі дані на внутрішньому сервері підприємства; хмарні, що функціонують через

інтернет, зберігаючи інформацію в хмарному середовищі; інтегровані, які є частиною більш комплексних систем, таких як ERP (системи планування ресурсів підприємства) чи SCM (системи керування ланцюгами постачання).

Впровадження WMS на складі сприяє підвищенню ефективності на всіх логістичних процесах, а якщо на склад додати робота AMR та налагодити зв'язок між ними, то така система може значно підвищити швидкість обробки замовлень та знизити ризик помилок. Але це потребує значних фінансових витрат, високого рівня технічної підготовки персоналу та складної інтеграції з існуючими складськими інформаційними системами. Особливо актуальною ця проблема є для малих та середніх підприємств, які не мають змоги повноцінно протестувати чи візуалізувати взаємодію таких роботизованих рішень у межах свого логістичного процесу до моменту реального впровадження.

В умовах відсутності доступного інструменту для віртуального моделювання та перевірки логіки взаємодії між складською інформаційною системою, оператором та мобільним роботом, підприємства стикаються з труднощами при оцінці доцільності та ефективності таких рішень. Це гальмує процес цифрової трансформації складів і впровадження інноваційних технологій автоматизації.

Проблема ускладнюється ще й тим, що більшість комерційних рішень не дають змоги побачити структуру системи «зсередини» – яким чином передаються дані між компонентами, як реагує система на команди користувача, як координується рух робота, та як відбувається зворотній зв'язок між елементами системи. Відсутність таких прикладних моделей унеможливорює попередню перевірку між інформаційною системою та фізичними або симульованими виконавчими механізмами, що підвищує ризики помилок під час впровадження.

Отже, створення системи у вигляді віртуального макету може стати досить корисним інструментом для підприємств, які розглядають можливість впровадження роботизованих логістичних рішень, але не готові відразу інвестувати значні кошти у фізичне обладнання та складну інтеграцію.

Віртуальний макет дозволяє змоделювати реальну логіку взаємодії між оператором, WMS та автономним мобільним роботом, а також візуалізувати ключові етапи процесу – від видачі завдання до виконання доставки. Підприємство отримує змогу побачити, як саме буде працювати майбутня система, виявити вузькі місця, протестувати різні сценарії роботи та адаптувати внутрішні бізнес-процеси без ризику простоїв або фінансових втрат. Крім того, такий підхід спрощує комунікацію між технічними фахівцями, управлінським персоналом і постачальниками обладнання – адже концепція стає зрозумілою навіть для нефхівців. Віртуальна модель також може використовуватись як презентаційний інструмент для залучення інвесторів або прийняття стратегічних рішень керівництвом. У результаті підприємство отримує гнучкий засіб попередньої перевірки інноваційної ідеї з можливістю поступового переходу до реального впровадження на складі.

## 2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ ТОВАРУ НА СКЛАДІ

### 2.1 Розроблення структурної схеми системи

Розроблення цілої системи та її візуалізація потребують детального розуміння процесів, компонентів та взаємозв'язків між ними. Для цього пропонується розробити структурну схему даного процесу. Така схема є важливим інструментом для ефективного проєктування, інтеграції, технічної документації, а також подальшого обслуговування системи. Структурна схема реалізована на рисунку 2.1.

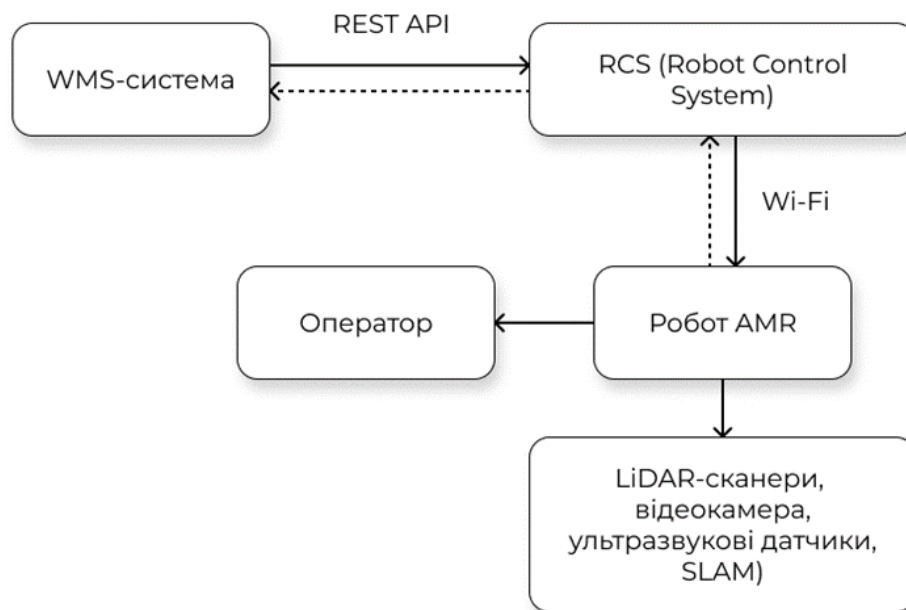


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи автоматизації транспортування товару на складі

Розглянемо кожний елемент схеми детальніше.

Першим компонентом є WMS-система, яка, як було зазначено у попередньому розділі, керує складом і повністю оптимізує його роботу. Якщо підприємство має на меті досягти повної або часткової автоматизації свого складського простору, впровадження WMS є необхідним кроком. У процесі транспортування товару на складі, WMS виступає як відправна точка, з якої надходять завдання на збір замовлення до всіх інших учасників логістичного ланцюга.

Наступним ключовим елементом є RCS (Robot Control System) – система керування мобільними роботами. Її основна функція полягає у прийнятті завдань від WMS, їхньому інтелектуальному розподілі між доступними роботами, ефективному управлінні їхніми маршрутами та поточним станом, а також поверненні статусу виконання кожного завдання. По суті, RCS виконує роль посередника між високорівневою складською системою та фізичними автономними роботами. Це дозволяє забезпечити оптимальну координацію, безперебійну навігацію та повний контроль над усією робото-технічною флотилією.

Взаємодія між цими двома системами відбувається за допомогою API (Application Programming Interface). API – це стандартизований інтерфейс, який дозволяє різним програмним додаткам ефективно обмінюватися даними між собою. REST (Representational State Transfer) є одним з найбільш популярних стилів проєктування таких API, що базується на протоколі HTTP. REST API працює через стандартні запити, за допомогою яких одна система може надсилати або отримувати необхідну інформацію від іншої. Основна функція API полягає в автоматичній передачі даних між системами [17].

Основним «діячем» у процесі транспортування товару на складі є AMR робот. Як вже було розглянуто у попередньому розділі, існує декілька типів таких роботів, кожен з яких має свої специфічні застосування. Однак у системі, що планується до розробки та візуалізації її функціонування, найбільш доречним і ефективним буде використання саме AMR, призначеного для роботи з поличними системами. Цей тип робота оснащений зверху спеціалізованим

механізмом зчеплення зі стелажем, на якому розміщені товари. Такий робот оснащений різноманітними сенсорами, що дозволяють йому повноцінно сприймати навколишнє середовище. Серед них варто виділити LiDAR-сканери, які створюють точні карти простору, відеокамери, що забезпечують візуальну інформацію, та ультразвукові датчики, які допомагають виявляти перешкоди. Крім того, ці роботи використовують складні навігаційні системи, що базуються на технології SLAM. Таке комплексне оснащення надає роботу можливість самостійно орієнтуватися у просторі без допомоги чи постійного керування з боку людини, а також ефективно та з надзвичайно високою точністю виконувати поставлені завдання.

Передача даних від RCS до AMR буде здійснюватися за допомогою Wi-Fi. Цей метод є одним із найпростіших та найефективніших способів бездротової передачі інформації між цими двома ключовими елементами.

## 2.2 Вибір технічних компонентів системи

Задля розуміння подальшої теоретичної реалізації системи у реальному житті, треба зробити вибір компонентів системи.

У виборі компонентів для даної системи пропонується відштовхуватися від початкового вибору головного діючого елемента, а саме робота AMR. Проаналізувавши ринок, було зроблено висновок, що найбільш підходящим роботом буде CartConnect від компанії Zebra Robotics Automation, призначений для автоматизації транспортування стелажів (FetchCart) у складських та виробничих приміщеннях (рис. 2.2.). Його технічні характеристики наведені у таблиці 2.1 [18].



Рисунок 2.2 – CartConnect від компанії Zebra Robotics Automation

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики CartConnect

Характеристика	Параметр
Вага	74 кг
Висота	49,6 см
Діаметр основи	57,3 см
Максимальна швидкість	1,5 м/с
Час автономної роботи	~ 9 год
Час зарядки	~ 3 год
Максимальне навантаження	до 57 кг
Сенсори	2D лазерна камера – 25 м / 220°, 3D камера – x2
Сумісність	Працює з хмарною платформою Fetchcore, що дозволяє керувати роботами та інтегрувати їх у вже існуючі WMS-системи

Даний робот має наступні переваги:

- автономна навігація: самостійно переміщується до місця завантаження, під'єднується до візка та транспортує його до пункту призначення без участі людини;
- гнучкість у використанні: підходить для різних робочих процесів, таких як комплектація замовлень, поповнення запасів, доставка сировини та обробка повернень;
- швидке впровадження: не потребує змін у інфраструктурі а може бути розгорнутий за кілька годин;
- безпека: відповідає стандартам CE та ANSI/RIA R15.08, що гарантує безпечну роботу поруч з людьми та іншою технікою.

Zebra Robotics Automation – міжнародний виробник автономних мобільних роботів, що спеціалізується на розробці інноваційних рішень для автоматизації внутрішньої логістики. Їхні продукти вирізняються високою адаптивністю, ефективністю та безпекою, що дозволяє підприємствам суттєво оптимізувати свої робочі процеси, зменшити фізичне навантаження на персонал та підвищити загальну продуктивність.

Для розрахунку необхідної кількості автономних мобільних роботів на складі, що обслуговує середній бізнес у сфері електронної комерції, необхідно врахувати кілька ключових операційних параметрів. Типове складське приміщення такого формату зазвичай охоплює площу близько 500 м<sup>2</sup>, обробляючи щоденно від 300 замовлень до 500 замовлень. Асортимент товарів переважно складається з побутових речей, які хоч і не є надто важкими, проте вирізняються значною різноманітністю. Важливим показником є час циклу одного робота, що включає повний рейс (рух, зупинки, підключення візка, доставка та повернення), який становить орієнтовно 5-7 хвилин. При восьми- або десяти-годинному робочому графіку та враховуючи, що автономна робота CartConnect сягає до 9 годин, можна зробити наступний розрахунок: 9 годин · 60 хвилин / 6 хвилин на рейс). Отже, для обслуговування середнього обсягу в 400 замовлень на день (припускаючи, що одне замовлення дорівнює одному рейсу), потрібно 400 рейсів / 100 рейсів/робот, що становить 4 роботи. Таким чином,

оптимальна кількість робіт для виконання поставлених завдань коливається від 4 одиниць до 5 одиниць.

Але реалізований в наступному розділі макет буде показувати роботу лише одного робота.

Наступним важливим компонентом системи, що потребує обґрунтованого вибору, є WMS-система. Ключовим критерієм при її виборі є сумісність із системою керування обраним роботом, зокрема з Fetchcore. Серед існуючих рішень, найбільш підходящою під ці вимоги є Oracle WMS Cloud. Oracle Warehouse Management Cloud – це передова хмарна система управління складом, яка надає повну прозорість запасів, забезпечує комплексний рівень автоматизації процесів та пропонує гнучку інтеграцію з іншими корпоративними системами. Вона дозволяє підприємствам ефективно керувати всіма аспектами складських операцій, суттєво зменшувати витрати та підвищувати рівень обслуговування клієнтів, що є критично важливим у сучасному бізнес-середовищі.

Система функціонує на базі Oracle Cloud Infrastructure (OCI), що гарантує високу масштабованість, надійність та безпеку даних. Інтерфейс Oracle WMS Cloud доступний через веб-браузер та мобільні пристрої, що дозволяє управляти складом у режимі реального часу, незалежно від місця розташування. Вона також містить вбудовані інструменти для глибокого аналізу продуктивності, відстеження ключових показників ефективності (KPI) та прийняття обґрунтованих рішень [20].

Oracle Corporation є однією з провідних світових компаній у сфері інформаційних технологій, що спеціалізується на розробці програмного забезпечення для управління бізнес-процесами. Важливо підкреслити, що Oracle WMS Cloud доступна для впровадження в Україні через офіційних партнерів Oracle. З початку повномасштабного вторгнення Oracle активно підтримує український бізнес, надаючи хмарні ресурси та сприяючи цифровій трансформації підприємств.

Зручність використання Oracle WMS Cloud у системі з роботами CartConnect полягає у її відкритій архітектурі, що дозволяє легко інтегруватися з

AMR-роботами через REST API. Завдяки високій масштабованості Oracle WMS Cloud та підтримці хмарного середовища, рішення легко адаптується до зростаючих потреб підприємства.

### 2.3 Розроблення алгоритму роботи системи

Для повноцінного розуміння всіх етапів функціонування запропонованої системи автоматизації, необхідно розробити алгоритм її роботи. Цей алгоритм буде ґрунтуватися на концепції Goods-to-Person (G2P), що в перекладі означає «товар до людини». Це сучасний підхід в автоматизації складських приміщень, при якому товари автоматично доставляються безпосередньо до робочої зони оператора, а не навпаки. Такий метод значно підвищує ефективність процесу збору замовлень, мінімізуючи витрати часу та зусиль. У системах G2P активно використовуються передові автоматизовані засоби транспортування, такі як AMR. Ці роботи ефективно переміщують стелажі з необхідними товарами безпосередньо до робочої зони комплектувальника. Це дозволяє скоротити час переміщень працівників, знизити фізичне навантаження та збільшити швидкість і точність обробки замовлень, особливо в електронній комерції, фармацевтиці чи розподільчих центрах [21].

Отже, алгоритм роботи даної системи наступний:

а) ініціація завдання на збір замовлення. Процес починається з надходження нового замовлення до системи WMS. Після отримання замовлення, WMS автоматично ідентифікує, які саме товари необхідні, а також визначає точне місцезнаходження відповідних стелажів, на яких вони зберігаються. На основі цієї інформації система формує завдання на переміщення конкретного стелажа;

б) передача завдання від WMS до RCS. Сформоване завдання з WMS передається до RCS через REST API. Це завдання містить у собі унікальний ідентифікатор товару (ID товару), а також детальну інформацію про координати стелажа, на якому знаходиться потрібний товар, і координати точки збору

замовлення, куди необхідно доставити товар. Оператор обирає номер замовлення, яке необхідно обробити, і надсилає команду роботу;

в) отримання завдання та початок руху AMR. Робот отримує завдання від RCS через Wi-Fi і негайно розпочинає рух. AMR самостійно навігує по складу, використовуючи всі свої вбудовані сенсори, що дозволяє йому орієнтуватися у просторі без зовнішнього втручання. Таким чином, робот точно під'їжджає до потрібного стелажа і здійснює механічне з'єднання з ним;

г) доставка стелажа до робочої зони оператора. Після з'єднання зі стележем, AMR доставляє його до робочої зони оператора, дотримуючись оптимальних маршрутів, визначених та оптимізованих системою RCS. Коли AMR прибуває до місця призначення, він автоматично повідомляє про це RCS, яка, в свою чергу, інформує WMS про завершення етапу доставки;

д) збір замовлення оператором. Оператор, використовуючи спеціалізований термінал, інтегрований з WMS, бачить повний перелік товарів, які необхідно зібрати зі стелажа. Після збору кожної позиції, оператор сканує її унікальний код для підтвердження. WMS негайно оновлює статуси зібраних позицій, забезпечуючи актуальність даних;

е) завершення збору та команда на повернення. Після того, як усі необхідні товари за стелажа зібрані та підтвержені оператором, WMS генерує запит на повернення стелажа на його початкове місце зберігання. Цей запит знову передається до RCS;

ж) транспортування стелажа назад. AMR транспортує стележ на його початкове місце. Після успішного повернення, AMR підтверджує завершення завдання через RCS, яка передає фінальний статус виконання до WMS.

## 2.4 Оцінка стійкості системи

Для подальших розрахунків спочатку проаналізуємо чи є система замкнутою або розімкнутою. Робот AMR використовує різноманітні сенсори для сприйняття навколишнього середовища. Дані з цих сенсорів подаються на вхід

системи SLAM, яка в реальному часі визначає місцезнаходження робота та будує карту оточення. Поточне положення робота та карта порівнюється з бажаним маршрутом та цільовим положенням, і на основі цього порівняння генеруються команди для двигунів робота. Це можна розглядати як приклад внутрішнього замкнутого контуру управління рухом та навігацією.

Система управління роботами постійно моніторить рух та статус всього флоту роботів у реальному часі. Система також отримує дані від WMS про нові замовлення та відправляє статуси виконання. Створюючи цикл зворотного зв'язку між програмними системами. WMS отримує інформацію про виконання замовлень від системи управління роботами, що дозволяє WMS оновлювати стан запасів та замовлень. Ця інформація, у свою чергу, впливає на генерацію нових завдань для роботів, завершуючи цикл зворотного зв'язку на високому рівні.

Отже, можна зробити висновок, що система є замкнутою.

Для аналізу стійкості системи, необхідно сформулювати математичну модель. Оскільки система є складною, ієрархічною, доцільно зосередитися на моделюванні ключової підсистеми – динаміки руху робота в замкнутому контурі управління. Припустимо, що система управління роботом може бути представлена у вигляді замкнутого контуру з пропорційним регулятором, що керує деяким об'єктом, який моделює динаміку руху робота.

Для демонстрації критеріїв стійкості, що вимагають аналізу характеристичного рівняння, приймемо наступну передавальну функцію розімкнутої системи:

$$W_{\text{роз}}(s) = \frac{K}{s(s+1)(s+2)}, \quad (2.1)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи, що відображає чутливість управління (припустимо  $K = 5$ );

$s$  – оператор Лапласа;

знаменник  $s(s+1)(s+2)$  – представляє собою динаміку об’єкта управління (робота), що має три полюси: один в початку координат, та два інші полюси на дійсній осі.

Таким чином, передавальна функція розімкнутої системи набуває вигляду:

$$W_{\text{роз}}(s) = \frac{5}{s(s+1)(s+2)} = \frac{5}{s^3+3s^2+2s}.$$

Характеристичне рівняння замкнутої системи визначається з умови  $1 + W_{\text{роз}}(s) = 0$ :

$$1 + \frac{5}{s^3+3s^2+2s} = 0, \quad (2.2)$$

$$s^3 + 3s^2 + 2s + 5 = 0.$$

Для оцінки стійкості замкнутої системи з характеристичним рівнянням  $D(s) = s^3 + 3s^2 + 2s + 5 = 0$  застосуємо три критерії стійкості: критерій Гурвіца, критерій Михайлова та критерій Найквіста.

Критерій Гурвіца є алгебраїчним критерієм, який дозволяє визначити стійкість лінійної системи за коефіцієнтами її характеристичного рівняння [22]. Отже, коефіцієнти:  $a_3 = 1$ ,  $a_2 = 3$ ,  $a_1 = 2$ ,  $a_0 = 5$ .

Так як усі коефіцієнти характеристичного рівняння одного знаку, то необхідна умова стійкості виконується. Для перевірки достатньої умови побудуємо головний визначник Гурвіца:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 3 & 5 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 5 \end{vmatrix}.$$

Підрахуємо значення визначників:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 3 & 5 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 5 \end{vmatrix} = 3(10 - 0) - 5(5 - 0) = 30 - 25 = 5 > 0,$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3 & 5 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = (3 \cdot 2) - (5 \cdot 1) = 6 - 5 = 1 > 0,$$

$$\Delta_1 = a_2 = 3 > 0.$$

Оскільки всі коефіцієнти характеристичного рівняння додатні, і всі визначники Гурвіца також додатні, система є стійкою.

Критерій Михайлова є частотним критерієм, який базується на аналізі годографа Михайлова – кривої, що описується вектором  $P(j\omega)$  у комплексній площині при зміні частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$ . Спочатку змінюємо  $s$  на  $j\omega$  в характеристичному рівнянні:

$$P(j\omega) = (j\omega)^3 + 3(j\omega)^2 + 2(j\omega) + 5, \quad (2.3)$$

$$P(j\omega) = -j\omega^3 - 3\omega^2 + 2j\omega + 5.$$

Розділимо на дійсну та уявну частини:

$$U(\omega) = 5 - 3\omega^2,$$

$$V(\omega) = 2\omega - \omega^3 = \omega(2 - \omega^2).$$

Крива Михайлова, побудована у середовищі Matlab, зображена на рисунку 2.3.

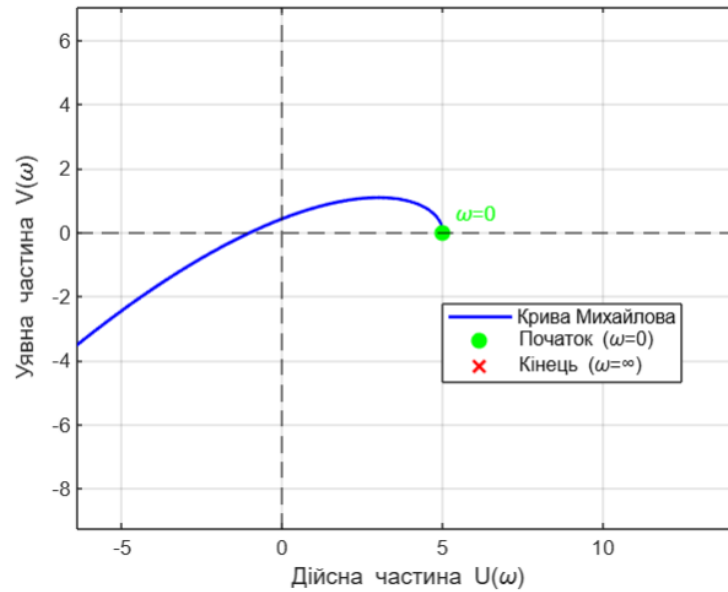


Рисунок 2.3 – Крива Михайлова

Годограф Михайлова починається на позитивній дійсній осі, послідовно проходить через I, II, III квадранти проти годинникової стрілки і не проходить через початок координат. Це відповідає умовам критерію Михайлова для системи третього порядку. Таким чином, система є стійкою.

Критерій Найквіста є графічним частотним критерієм, який базується на аналізі годографа розімкнутої системи  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  у комплексній площині. Критерій стверджує, що для стійкості замкнутої системи, годограф розімкнутої системи  $W_{\text{роз}}(j\omega)$  при зміні  $\omega$  від  $-\infty$  до  $+\infty$  повинен обертатися навколо критичної точки  $(-1, 0)$  стільки разів проти годинникової стрілки, скільки полюсів розімкнутої системи лежить у правій півплощині. Отже, годограф Найквіста, побудований у середовищі Matlab, зображено на рисунку 2.4.

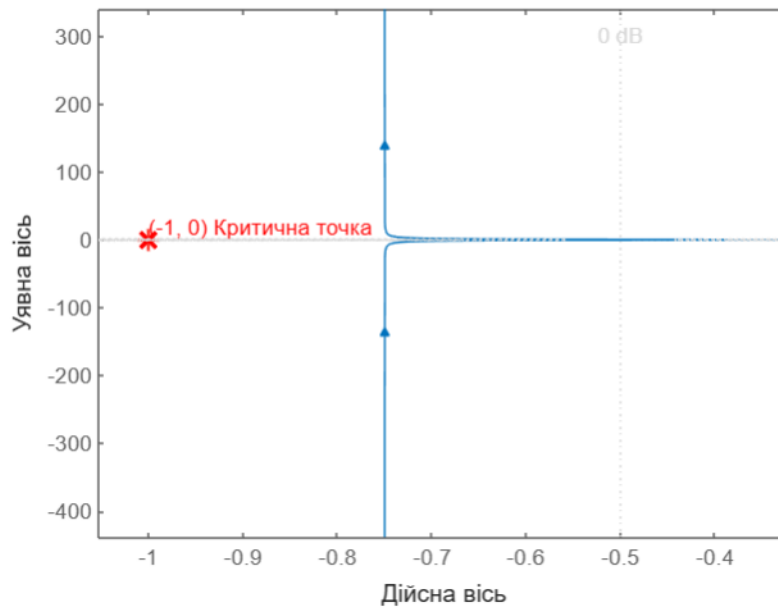


Рисунок 2.4 – Крива Найквіста

На рисунку немає явного відображення нескінченної дуги, але навіть без нього можна інтерпретувати стійкість системи. Для  $W_{\text{роз}}(s) = \frac{5}{s^3 + 3s^2 + 2s}$  полюси знаходяться при  $s = 0$ ,  $s = -1$ ,  $s = -2$ . Жоден з них не знаходиться в правій півплощині. Отже, кількість полюсів розімкнутого контуру в правій півплощині  $P = 0$ .

Також на графіку видно, що крива Найквіста не обходить критичну точку  $(-1, 0)$ . Отже, кількість обходів критичної точки  $N = 0$ .

За формулою Найквіста кількість полюсів замкнутого контуру в правій півплощині  $Z = P - N = 0$ .

Система із замкнутим контуром не має полюсів у правій півплощині, тому вона є стійкою.

Отже, як показав проведений вище аналіз за трьома критеріями стійкості, система є стійкою.

## **3 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ ТОВАРУ НА СКЛАДІ**

3.1 Вибір середовища та мови програмування для розроблення системи у вигляді віртуального макету

Розробка системи автоматизації транспортування товару на складі у вигляді віртуального макету пропонується до реалізації у середовищі Visual Studio. Це надзвичайно потужне інтегроване середовище розробки, створене компанією Microsoft, яке є оптимальним рішенням для створення різноманітних програмних продуктів. Visual Studio надає розробникам найсучасніші інструменти, що дозволяють створювати додатки будь-якої складності, використовуючи широкий спектр мов програмування та орієнтуючись на різні платформи. Середовище підтримує роботу з більш ніж 36 мовами програмування, надаючи інтелектуальний редактор коду та потужні інструменти налагодження для більшості з них, за умови наявності відповідних служб підтримки.

Однією з ключових переваг Visual Studio є його вдосконалений редактор, який пропонує такі функції, як підсвічування синтаксису, інтелектуальне автодоповнення коду, автоматичне виявлення помилок та інші інструменти, що значно підвищують швидкість і зручність написання програмного коду. Крім того, важливою перевагою є вбудована система налагодження, яка дозволяє не лише знаходити та виправляти помилки, але й детально досліджувати поведінку програм у процесі їхнього виконання. Це позитивно впливає на стабільність і загальну якість кінцевого продукту.

Сама розробка візуальної складової буде відбуватися за допомогою OpenGL (Open Graphics Library) – це кросплатформний, відкритий стандарт для розробки 2D та 3D-графіки, який широко застосовується в ігровій індустрії, для наукової візуалізації та в симуляційних системах.

Ця бібліотека надає низькорівневий доступ до графічного процесора, дозволяючи створювати високопродуктивну графіку в реальному часі. Оскільки OpenGL підтримується практично на всіх сучасних операційних системах та апаратних платформах, він є універсальним інструментом для розробки графічних додатків. Використання OpenGL для створення віртуального макету системи транспортування товару на складі є доцільним тому, що OpenGL забезпечує досить реалістичну візуалізацію об'єктів і простору у тривимірному середовищі, що дозволяє з високою точністю змодельовати пересування AMR-роботів, стелажів та структуру складу. Крім того, він діє змогу розробляти інтерактивні сцени, де користувач може в реальному часі спостерігати за маршрутами робота, точками завантаження та розвантаження, а також взаємодією з оператором.

Оптимальним вибором мови програмування для цього проєкту буде C++. Його доцільність зумовлена високою швидкістю, гнучкістю та відмінною сумісністю з OpenGL. Завдяки низькорівневому контролю над пам'яттю та системними ресурсами, C++ дозволяє ефективно обробляти графіку в реальному часі та реалізовувати складну логіку поведінки AMR-робота, обробку подій та анімацію. Це робить її підходящою мовою для вирішення поставлених завдань.

### 3.2 Розроблення технічної складової складського робота

Реалізація технічної моделі роботи AMR-робота надасть стійке розуміння логіки роботи всіх сенсорів та технологій присутніх у робота, що допоможе зрозуміти логіку його пересування по складу у реальному житті.

Для реалізації цієї моделі було взято два середовища: Wokwi та Tinkercad. Причиною вибору одразу двох середовищ стала неможливість досконало продемонструвати технічну роботу AMR в жодному з них. Перша модель робота розроблена в середовищі Tinkercad із використанням Arduino Uno як основного мікроконтролера. До плати підключено три ультразвукові датчики HC-SR04, які розташовані спереду, ліворуч та праворуч від корпусу моделі, що дозволяє

здійснювати базове сприйняття навколишнього середовища для ухилення від перешкод. Два двигуни постійного струму підключені через драйвер L298N, що забезпечує можливість керування напрямком та швидкістю руху робота.

Окремим компонентом є сервопривід, до якого прикріплений ще один ультразвуковий датчик. Він виконує функцію обертового сканера для імітації LiDAR, аналогічно до справжніх AMR-роботів, де використовуються обертові або лінійні сканери для побудови карти простору. Схема підключення зображена на рисунку 3.1.

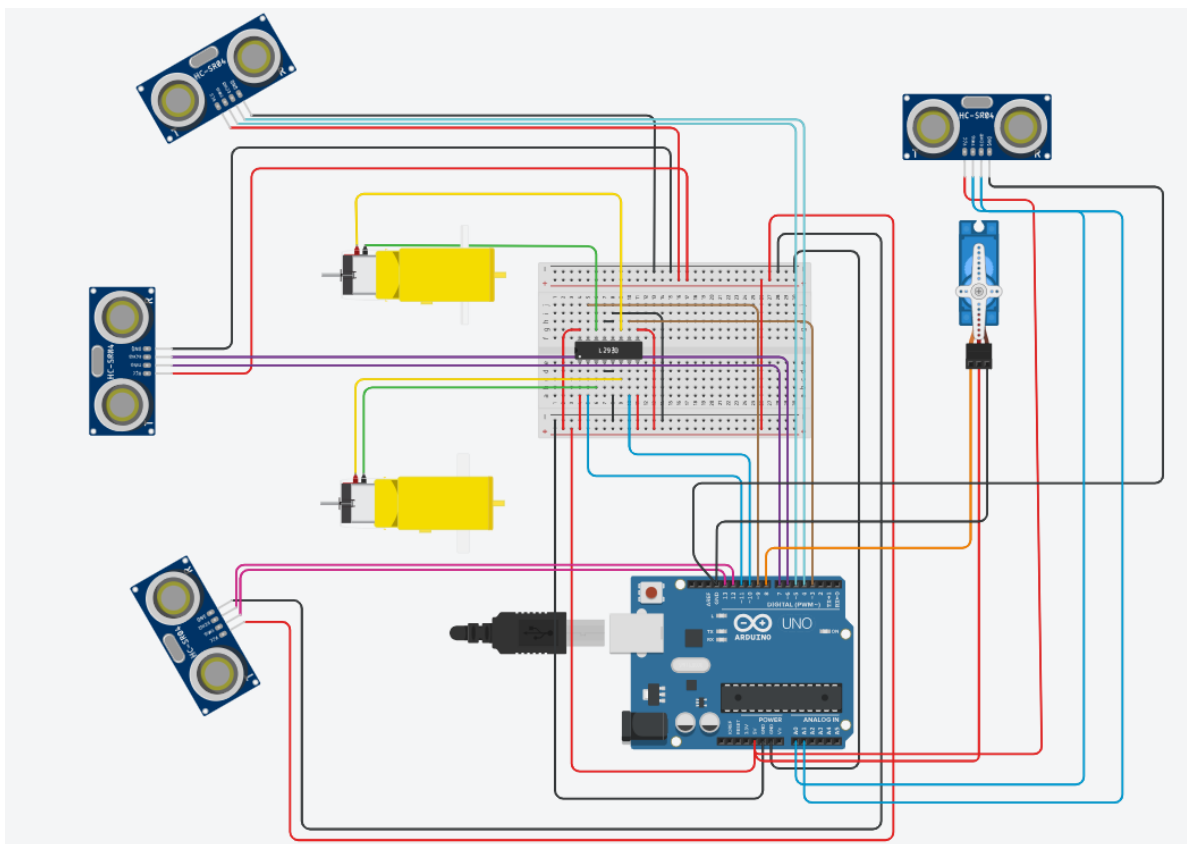
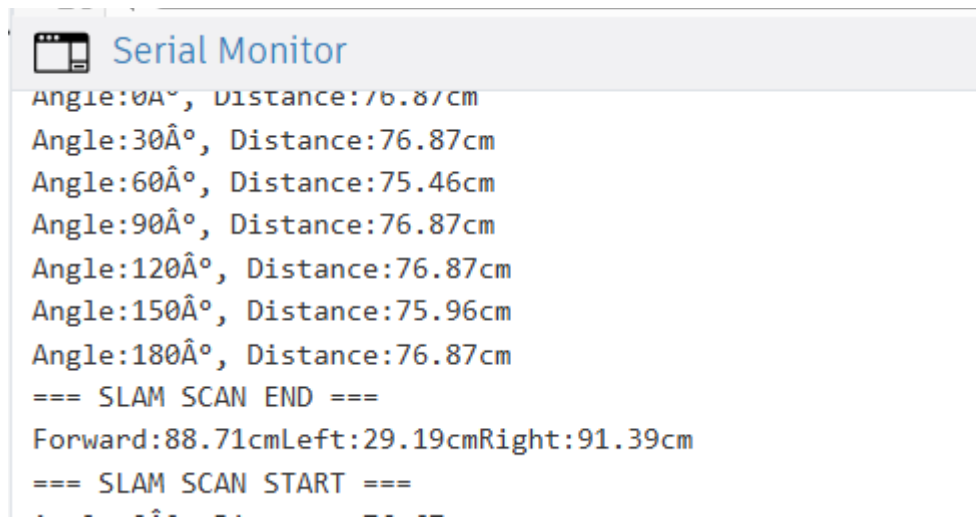


Рисунок 3.1 – Схема підключення для першої моделі робота

Програмна частина моделі складається з кількох функцій руху: `Ahead()`, `Back()`, `Right()`, `Left()`, `Stop()`, які реалізують поведінку на основі показань трьох фронтальних ультразвукових сенсорів. Алгоритм ухилення від перешкод реалізований через умовні конструкції `if`, що порівнюють відстані від кожного з датчиків до умовних об'єктів. Також у функції `loop()` викликається окрема

функція `scanSurroundings()`, яка відповідає за імітацію побудови карти навколишнього середовища (SLAM) шляхом повороту сервоприводу з ультразвуковим сенсором від 0 до 180° із кроком 30°. На кожному куті відбувається вимірювання відстані до об'єктів попереду. Отримані значення виводяться на Serial Monitor (рис. 3.2), що дозволяє візуально побудувати уявну «карту простору», яку в реальній системі аналізує SLAM-алгоритм.



```

Serial Monitor
Angle:0Â°, Distance:76.87cm
Angle:30Â°, Distance:76.87cm
Angle:60Â°, Distance:75.46cm
Angle:90Â°, Distance:76.87cm
Angle:120Â°, Distance:76.87cm
Angle:150Â°, Distance:75.96cm
Angle:180Â°, Distance:76.87cm
=== SLAM SCAN END ===
Forward:88.71cmLeft:29.19cmRight:91.39cm
=== SLAM SCAN START ===

```

Рисунок 3.2 – Вивід даних на Serial Monitor

Для реалізації другої моделі у середовищі Wokwi було обрано плату Arduino Mega 2560, через її велику кількість пінів та пам'яті, що необхідно для обробки даних від численних датчиків, як у реальних AMR-роботах. Також у схемі використовуються 4 світлодіоди як візуальні індикатори роботи двигунів (ліві LED – колеса лівого борту, праві – правого): при активації відповідних каналів драйвера L298N вони загоряються, показуючи напрямок і стан руху (вперед, назад, поворот), що дозволяє текстувати логіку керування без підключення реальних моторів, яких у середовищі Wokwi, нажаль, немає. Для сенсорного сприйняття інтегровано шість статичних ультразвукових датчиків, що забезпечують широке поле виявлення перешкод з усіх боків, а також додатковий ультразвуковий датчик на сервоприводі, що імітує функціонал LiDAR, як в першій моделі. Схема зображена на рисунку 3.3.

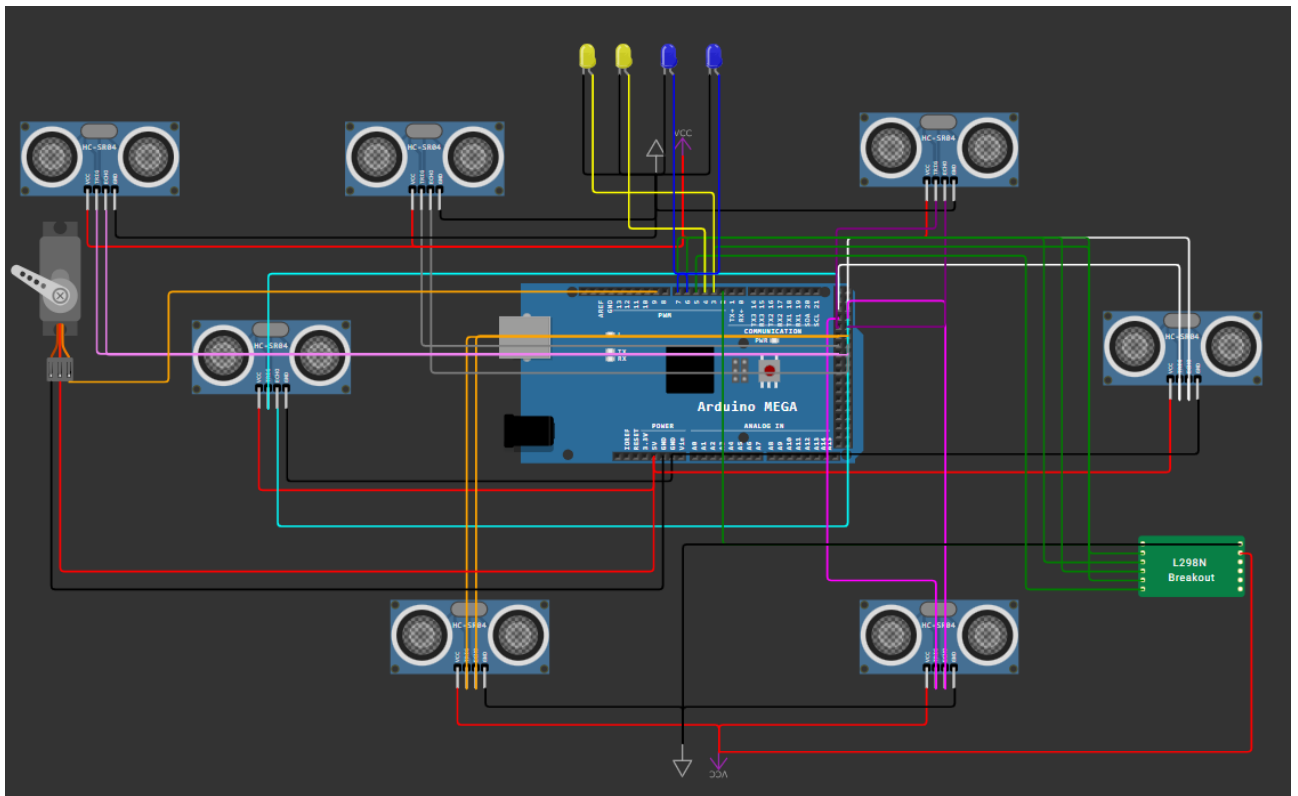


Рисунок 3.3 – Схема підключення для другої моделі робота

Логіка програми будується навколо постійного аналізу середовища та адаптивного руху. У `setup()` відбувається ініціалізація всіх пінів для сенсорів і двигунів за допомогою `pinMode()` та підключення сервоприводу за допомогою `servo.attach()`. Рух робота вперед, назад, вліво та вправо керується функціями `forward()`, `backward()`, `turnLeft()`, `turnRight()`, які використовують `digitalWrite()` для встановлення напрямку двигунів та `analogWrite()` для контролю їхньої швидкості. Головна логіка в `loop()` безперервно зчитує відстані за допомогою `readDistance()`, яка посилає ультразвуковий імпульс і вимірює час повернення ехо-сигналу за допомогою `pulseIn()`, перетворюючи його в сантиметри. На основі цих показників, робот приймає рішення: якщо фронтальні або кутові датчики виявляють перешкоду, робот зупиняється, відступає, а потім повертає, використовуючи `delay()` для паузи між діями. Бічні датчики викликають відповідний поворот, а «лідар»-датчик, що обертається за допомогою `servo.write()`, активно сканує простір, викликаючи маневр при виявленні перешкоди. Таким чином програма реалізує автономну навігацію з уникненням

перешкод: робот за замовчуванням рухається вперед, але його поведінка постійно коригується на основі даних від шести статичних ультразвукових датчиків, що дозволяють виявити перешкоди спереду, збоку та по кутах, і відповідним чином виконувати маневри відступу або повороту.

### 3.3 Розроблення системи у вигляді віртуального макету

Для наглядної візуалізації роботи системи пропонується розробити віртуальний макет, що буде представляти собою 3D-реалізацію частини складського приміщення, робота AMR, точки оператора, де будуть складатися замовлення, та конвеєру, що буде транспортувати коробки із складеними замовленнями до наступного етапу пакування.

#### 3.3.1 Створення візуальних об'єктів у середовищі OpenGL

Для реалізації графічного інтерфейсу та 3D-візуалізації використовуються декілька ключових бібліотек Windows API та OpenGL: `#pragma comment(lib,"user32.lib")` – для роботи з базовими функціями користувацького інтерфейсу Windows; `#pragma comment(lib,"gdi32.lib")` – для базової графіки у Windows; `#pragma comment(lib,"glu32.lib")` – допоміжна бібліотека для OpenGL; `#pragma comment(lib,"opengl32.lib")` – основна бібліотека OpenGL для Windows; `#include <windows.h>` – базовий заголовок для використання Windows API, необхідний для налаштування OpenGL у віконному середовищі Windows Forms (створення та прив'язка OpenGL-контексту до вікна); `#include <GL/gl.h>` – основна заголовочна бібліотека OpenGL; `#include <GL/glu.h>` – заголовочний файл для GLU; `#include <cmath>` – стандартна бібліотека для математичних функцій; `#include "MyForm1.h"` – заголовочний файл, який містить декларацію форми MyForm; `#include <ctime>` – стандартна бібліотека для роботи з часом, яка використовується для анімацій, оновлень станів, симуляції руху тощо; `#include <WinUser.h>` – заголовок із додатковими визначеннями Windows User API, який дає змогу обробляти взаємодію користувача з інтерфейсом.

Для моделювання складської сцени треба створити «каркас» візуального середовища. Для цього було реалізовано графічний інтерфейс Windows Forms, який поєднаний із тривимірною візуалізацією на базі OpenGL. Усе це використовується для моделювання поведінки складського робота та віртуального середовища, в якому він працює. Форма MyForm є основним вікном додатку, де відображається сцена. Вона містить різні елементи керування – вертикальні та горизонтальні скролбари (VScrollBar, HScrollBar), а також таймери для відтворення анімацій (animationTimer, boxTimer) та рендерингу сцени (renderTimer). Під час ініціалізації встановлюються основні параметри вікна та прикріплюються обробники подій, зокрема обробка натискань клавіш, прокручування колесика миші, зміни розмірів вікна та завершення роботи.

Особливу роль відіграє функція InitializeOpenGL, яка відповідає за налаштування OpenGL-контексту в межах Windows-інтерфейсу. Вона використовує Windows API для доступу до дескриптора контексту пристрою, обирає піксельний формат і створює OpenGL-контекст за допомогою функцій ChoosePixelFormat, SetPixelFormat, wglCreateContext і wglMakeCurrent. Крім того, вона активує освітлення (glEnable(GL\_LIGHTING)), матеріали (glEnable(GL\_COLOR\_MATERIAL)), а також глибину (glEnable(GL\_DEPTH\_TEST)) для коректної тривимірної візуалізації. Встановлюються параметри освітлення, такі як навколишнє (AMBIENT), дифузне (DIFFUSE) та дзеркальне (SPECULAR) світло, а також його позиція у сцені.

Функція RenderScene відповідає за безпосередню візуалізацію сцени кожного кадру. Вона очищає екран та буфер глибини, налаштовує камеру (gluLookAt) залежно від положення скролбарів та значення масштабування (zoom), після чого викликає функції для рендерингу основних об'єктів сцени: підлоги, конвеєра, стола, робота та стелажів.

Код містить логіку для масштабування сцени за допомогою прокрутки коліщатка миші (MouseWheel). Зміна значення змінної zoom дозволяє наближати або віддаляти камеру, тим самим забезпечуючи зручну навігацію по

віртуальному складу. Змінні `vspos` та `hspos` змінюються при взаємодії з скролбарами та впливають на позицію огляду, а потім викликається `RenderScene` для оновлення зображення.

Для побудови всіх об'єктів макету використовуються дві основні фігури – куб та циліндр. Функція `Cube(float size)` створює просту геометричну фігуру куб за допомогою базових засобів OpenGL. Вона використовується для побудови тривимірного куба зі стороною довжиною `size`, що розташовується симетрично відносно початку координат. Розмір обчислюється як  $half = size/2.0f$ , тобто координати вершин задаються відносно центру куба. Сам процес рендерингу куба реалізується через інструкцію `glBegin(GL_QUADS)`, що означає малювання чотирикутників – кожна грань куба складається з чотирьох вершин. Для кожної з шести граней задається нормаль за допомогою `glNormal3f(...)`. Нормалі вказують напрям поверхні й необхідні для правильного розрахунку освітлення, тіней та відбиття світла. Всі шість граней малюються вручну, задаючи координати кожної вершини. Такий підхід забезпечує повний контроль над геометрією куба, що дуже зручно для компонентів складського обладнання, таких як коробки, корпус стелажів, стіл та стілець на точці оператора тощо. На рисунку 3.4 зображені готові стелажі із коробками, які повністю побудовані із кубічних фігур, окрім колес.



Рисунок 3.4 – Стелажі з товаром побудовані за допомогою кубів

Функція `Cylinder(float baseRadius, float topRadius, float height, int slices, int stacks)` створює об'ємний об'єкт – циліндр – за допомогою інструментів з бібліотеки `GLU (OpenGL Utility Library)`, яка надає розширені засоби побудови геометричних фігур. У цій функції створюється допоміжний об'єкт типу `GLUquadric*`, який використовується для побудови дисків (`gluDisk`) і тіла самого циліндра (`gluCylinder`). Циліндр визначається параметрами: радіус основи (`baseRadius`), радіус верхівки (`topRadius`), висота (`height`), також кількість сегментів по колу (`slices`) і по висоті (`stacks`). Ці параметри впливають на деталізацію циліндра: чим більше значення `slices`, тим плавнішим і більш округлим виглядає об'єкт. Спочатку рендериться нижня основа за допомогою `gluDisk`, потім верхня основа, а між ними – саме тіло циліндра. Візуально він виглядає як труба або стовп, що робить його придатним для побудови таких елементів, як колеса та основа робота (рис. 3.5).

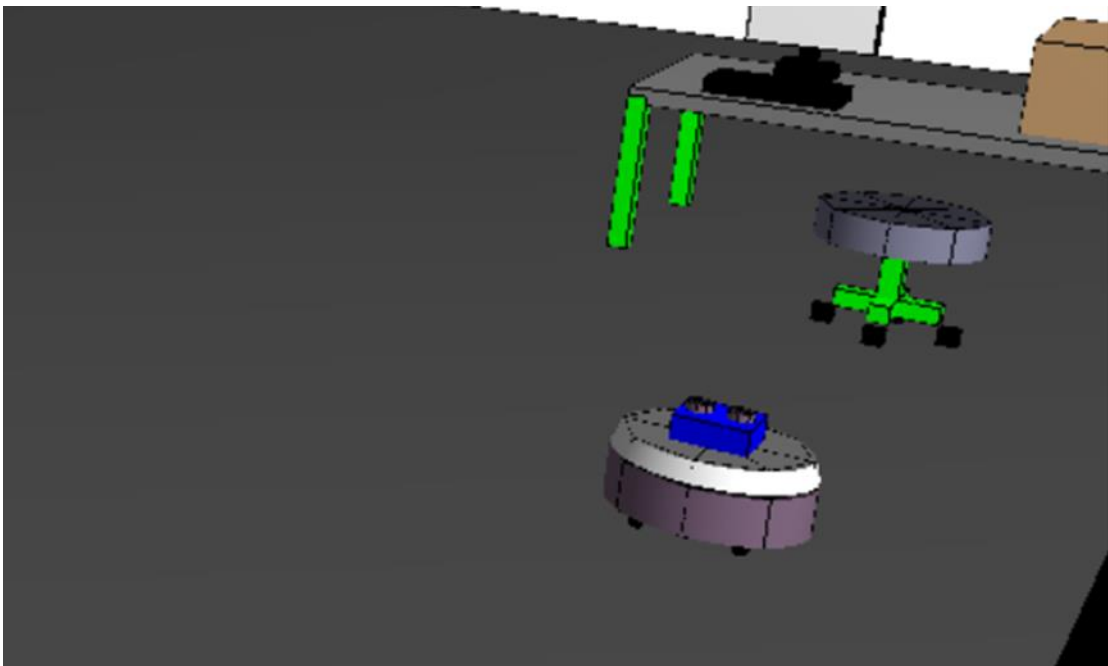


Рисунок 3.5 – Робот AMR, створений із використанням циліндричних фігур

В обох функціях активно використовуються базові принципи тривимірної графіки: робота з координатами у просторі, нормаллями для освітлення, ієрархією трансформацій (через `glPushMatrix()` та `glPopMatrix()` в циліндрі, які зберігають і

відновлюють матрицю трансформації). Також використовується `gluQuadricTexture(quadric, GL_TRUE)`, що вказує, що об'єкт може мати текстуру, хоча в базовій версії текстурування не застосовується – це закладено на перспективу.

Таким чином візуальна частина розробки набуває свій остаточний вигляд, що зображено на рисунку 3.6.

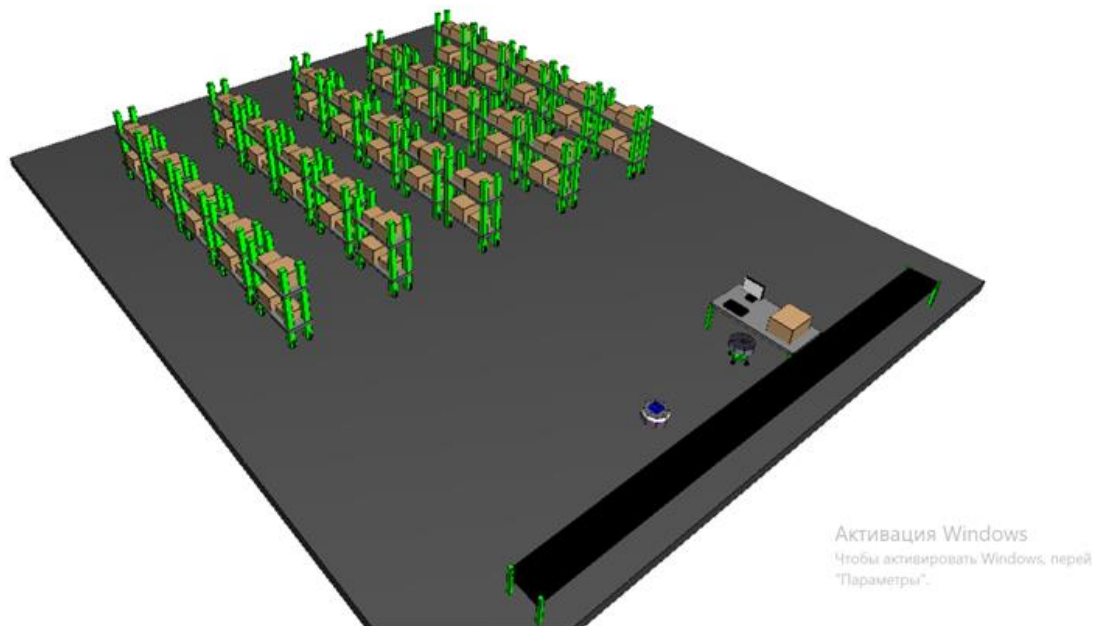


Рисунок 3.6 – Візуально готовий віртуальний макет

### 3.3.2 Розроблення логіки функціонування системи

Основною частиною логіки анімації та переміщення складського робота є функція `AnimationTimer_Tick`. Вона викликається періодично за таймером і відповідає за оновлення стану робота, а також за переміщення його до різних точок маршруту залежно від поточного стану (`robotState`). На початку функції перевіряється, чи робот перебуває в русі. Якщо він не рухається і не очікує натискання клавіші пробілу (`WaitingForSpace`), то, у випадку, коли він у стані очікування (`Idle`) і немає активного замовлення, функція запускає таймер переміщення коробки. Після цього завжди викликається функція `RenderScene`, яка оновлює візуалізацію сцени.

У операторі `switch (robotState)` рух робота здійснюється між контрольними точками маршруту (`ride points`), стелажми (`rack positions`) і базовою позицією (`home`). Функція `MoveTo` використовується для поступового переміщення робота по осі `X` або `Z` із заданою швидкістю. Кожен стан відображає конкретну дію або етап переміщення: під'їзд до стелажа, захоплення, транспортування до зони оператора, очікування натискання клавіші, повернення стелажа на місце тощо. Після завершення обробки замовлення (тобто коли всі стелажі з замовленнями оброблено), робот повертається на точку очікування. Якщо є наступний стелаж, робот продовжує маршрут; якщо замовлення завершено, очищуються змінні, і система переходить у режим очікування нового замовлення, про що повідомляється через `MessageBox`.

Функція `MyForm_KeyDown` обробляє натискання клавіш: при `Enter` відкриває форму вибору замовлення; при `Space` сигналізує, що користувач підтвердив дію (оператор обрав потрібний товар зі стелажа, і робот може повертати його на місце).

Ключовим етапом в інтерактивному процесі вибору та виконання замовлення складським роботом є форма `MyForm1.h` (рис. 3.7). Як вже прописувалося вище, вона викликається в основному вікні програми при натисканні клавіші `Enter`, якщо робот не виконує завдань. Вона містить три основні елементи інтерфейсу: кнопку «Нові замовлення» для генерації нових випадкових замовлень, список `ListBox` для перегляду згенерованих замовлень і кнопку «Вибрати замовлення», яка дозволяє підтвердити вибране замовлення. Кожне замовлення представлено класом `Order`, що містить назву та список номерів стелажів, з яких потрібно забрати товари. Після натискання кнопки «Нові замовлення» викликається метод `GenerateOrders()`, який створює 10 випадкових замовлень, кожне з випадковим переліком унікальних номерів стелажів (до 5 штук). Згенеровані замовлення додаються у список `AllGenerateOrders` і відображаються у вигляді рядків у `ListBox`. Якщо користувач натискає кнопку «Вибрати Замовлення», програма перевіряє, чи вибраний

елемент у списку, і, якщо так – закриває форму та повертає результат DialogResult::OK.

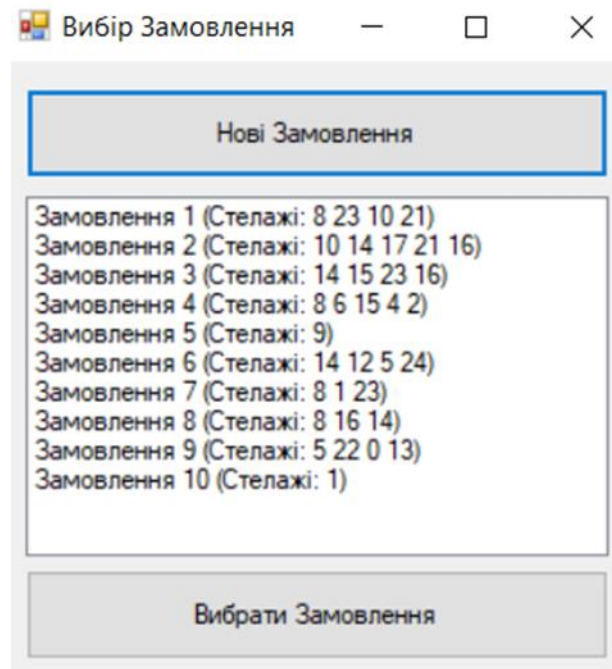


Рисунок 3.7 – Форма MyForm1.h для вибору замовлення

Також у кодї реалізовується анімація руху коробки по конвеєру після того, як замовлення укомплектоване оператором, у функції `BoxTimer_Tick`. Вона поступово переміщує коробку зі стартової позиції до двох заданих точок і повертає її назад на початок. Залежно від стану `boxState`, виконується рух у потрібному напрямку з постійною швидкістю. Після досягнення цілі стан змінюється, що визначає подальшу траєкторію руху.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Впровадження такої системи автоматизації транспортування товару на складі у складські операції вимагає ретельного та всебічного підходу до забезпечення охорони праці. Хоча такі технології, як AMR-роботи Zebra CartConnect, розроблені з урахуванням високих стандартів безпеки та здатні безпечно співіснувати з працівниками та іншими транспортними засобами, їх інтеграція в динамічне робоче середовище вимагає глибокого розуміння потенційних ризиків та впровадження ефективних заходів їх мінімізації. AMR оснащені такими сенсорами, як LiDAR, відеокамери та ультразвукові датчики, які у поєднанні з SLAM дозволяють роботам у реальному часі виявляти перешкоди, динамічно перепланувувати маршрути та здійснювати реактивне керування для уникнення зіткнень. Це значно підвищує рівень безпеки, зменшуючи ймовірність інцидентів, пов'язаних з рухом.

Крім того, автоматизація рутинних та фізично обтяжливих завдань, таких як транспортування товарів, сприяє зниженню фізичного навантаження на персонал, що, у свою чергу, зменшує ризик травм, пов'язаних з ручною працею, та підвищує загальну задоволеність працівників. Роботи, що рухаються зі швидкістю, яка відповідає типовій швидкості пересування людей по складу, спрощують їх інтеграцію в існуючі робочі процеси, дозволяючи людям зосередитися на більш складних та ціннісних завданнях. Однак, незважаючи на вбудовані функції безпеки, важливо пам'ятати, що ефективність цих систем залежить від безперебійної роботи всіх компонентів, включаючи програмне забезпечення та комунікаційну інфраструктуру.

Окрім технічних аспектів, критично важливим є забезпечення безпечної та ефективної взаємодії між автономними роботами та персоналом. Співпраця людини та робота вимагає не лише фізичного розмежування або динамічного уникнення перешкод, але й чіткого розуміння працівниками поведінки роботів, їхніх робочих зон та потенційних сценаріїв взаємодії. Тому, розробка та

впровадження комплексних програм навчання для всього персоналу, який працює на складі, є обов'язковою умовою. Ці програми повинні охоплювати не лише основи експлуатації роботів, але й протоколи безпеки, процедури реагування на нештатні ситуації та принципи спільного використання робочого простору. Такий підхід сприяє формуванню культури безпеки, де кожен працівник усвідомлює свою роль у підтримці безпечного середовища, мінімізуючи ризики, пов'язані з людським фактором, та підвищуючи довіру до автоматизованих систем.

На додаток до безпосередньої взаємодії, довгострокова безпека та ефективність системи значною мірою залежать від надійності допоміжної інфраструктури та постійного моніторингу. Забезпечення стабільного та високопродуктивного бездротового зв'язку, що відповідає вимогам низької затримки для критично важливих операцій AMR є фундаментальним. Це включає не лише вибір відповідних стандартів Wi-Fi, але й оптимізацію мережевої архітектури, мінімізацію перешкод та впровадження механізмів швидкого роумінгу для мобільних пристроїв. Системи управління роботами, такі як FetchCore, відіграють ключову роль у постійному моніторингу стану роботів, їхнього місцезнаходження та продуктивності, дозволяючи оперативно виявляти аномалії та потенційні проблеми.

Таким чином, забезпечення стабільної та низьколатентної мережевої інфраструктури, регулярне навчання персоналу щодо безпечної взаємодії з роботами, а також постійний моніторинг та адаптація системи до змінних умов є невід'ємними складовими комплексного підходу до охорони праці в автоматизованому складському середовищі.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи були виконані наступні завдання:

- проаналізовано існуючі методи, засоби та технології автоматизації складських приміщень;
- розроблено структурну схему та алгоритм роботи системи автоматизації транспортування товару на складі для повноцінного розуміння всіх етапів функціонування запропонованої системи автоматизації;
- обрано технічні компоненти системи, середовище та мову програмування для реалізації віртуального макету системи;
- розроблено технічну складову моделі складського робота, що надало стійке розуміння логіки всіх сенсорів та присутніх у робота технологій;
- розроблено віртуальний макет системи автоматизації транспортування товару на складі для наглядної візуалізації роботи системи.

Результатом роботи є система автоматизації транспортування товару на складі реалізована у вигляді віртуального макету і технічної складової моделі складського робота. За допомогою технічної реалізації складського робота можна зрозуміти логіку його роботи та орієнтації в просторі, а за допомогою віртуального макету можна наглядно побачити роботу всієї системи, логіку прийняття рішень, пересування робота по складському приміщенню, та взаємодії з оператором.

Така система може використовуватися для впровадження на підприємствах, що прагнуть автоматизувати свої логістичні процеси, задля досягнення більш ефективної роботи свого бізнесу. Вона дозволяє оптимізувати деякі етапи роботи на складі, зменшуючи витрати часу та людських ресурсів. Завдяки гнучкості та масштабованості, систему можна адаптувати під потреби малого, середнього та великого бізнесу не тільки в галузі електронної комерції, а й в інших галузях, де важливими є точність, швидкість та автоматизований контроль складських операцій.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В.Токарева, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2022. 66 с.

3. Склад фармацевтичного дистриб'ютора. Lagerausstattung in Deutschland | KAPELOU. URL: <https://kapelou.com/wp-content/uploads/2021/01/Platforma2-scaled-e1624976970397.jpg> (дата звернення: 20.04.2025).

4. Merkmale der Automatisierung eines pharmazeutischen Lagers. Kapelou. URL: <https://kapelou.com/blog/statti/sklad> (дата звернення: 23.04.2025).

5. Вертикальний конвеєр для ящиків. Lagerausstattung in Deutschland | KAPELOU. URL: [https://kapelou.com/wp-content/uploads/2020/11/IMG\\_1116-e1611841321423.png](https://kapelou.com/wp-content/uploads/2020/11/IMG_1116-e1611841321423.png) (дата звернення: 23.04.2025).

6. Стрічковий конвеєр. Lagerausstattung in Deutschland | KAPELOU. URL: <https://kapelou.com/wp-content/uploads/2023/05/Vid-tari-dlya-strichkovogo-konveiera.jpg> (дата звернення: 25.04.2025).

7. Системи AS/RS для палетного зберігання. Sklad Service | Комплексні рішення для складу. URL: [https://ssk.ua/uploads/products/67/da/w704\\_erpqfqn3g\\_719abcaa.jpg](https://ssk.ua/uploads/products/67/da/w704_erpqfqn3g_719abcaa.jpg) (дата звернення: 26.04.2025).

8. Case & Piece Picking Solutions. Lösungen für Intralogistik, Lieferkettensautomatisierung & Lagerverwaltung. URL: <https://www.dematic.com/en-us/products/case-and-piece-picking/> (дата звернення:

29.04.2025).

9. AS/RS AUTOMATED STORAGE SYSTEMS. [temesist.com](https://temesist.com/en/asrs-automated-storage-systems/). URL: <https://temesist.com/en/asrs-automated-storage-systems/> (дата звернення: 01.05.2025).

10. Raevskaya N. AGV - Складські роботи. Інтеграція систем і даних. Впровадження ERP систем. TQM systems. URL: <https://tqm.com.ua/ua/likbez/interview-ua/avg-roboty-na-skladi> (дата звернення: 05.05.2025).

11. Мостові крани вантажопідйомністю 30 тонн. Professional Overhead Crane Manufacturers From China | DGCRANE. URL: <https://www.dgcrane.com/wp-content/uploads/2025/03/Moving-large-machinery-components-in-assembly-lines.jpg> (дата звернення: 09.05.2025).

12. Шевченко А. А., Хрустальова С. В. Автоматизований модуль керування складським роботом-контролером / Матеріали міжнародного науково-практичного форуму «ММФ–2025». Секція: Автоматизація комп'ютерно-інтегрованих технологій. Харків: ХНУРЕ, 2025. С. 16.

13. Роботизація складу: майбутнє за прогресивними технологіями. Портал топ-менеджерів оптової та роздрібної торгівлі. URL: <https://trademaster.ua/logistic/313375> (дата звернення: 13.05.2025).

14. Роботи AMR у складських приміщеннях. Industrial computers and systems, industrial automation components, industrial chassis and cpu boards. Rugged and reliable solution for power. energy, transport, chemical, oil and gas area. Digital and retail. URL: [https://www.proxis.ua/files/news\\_gallery/advantechai\\_al\\_Automated\\_Retail\\_WarehouseAMR-1.jpg](https://www.proxis.ua/files/news_gallery/advantechai_al_Automated_Retail_WarehouseAMR-1.jpg) (дата звернення: 15.05.2025).

15. І. Невлюдов, С. Новоселов, К. Сухачов. Метод одночасної локалізації та картографування для побудови 2,5D-карти навколишнього середовища засобами ROS. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2023. №2 (24). С. 145–160.

16. WMS системи керування складом: що це і як це працює - Wezom. IT-компанія повного циклу розробки програмних продуктів WEZOM - Київ, Україна. URL: <https://wezom.com.ua/ua/blog/wms-sistemy-upravleniya-skladom> (дата звернення: 20.05.2025).

17. Що таке rest api: основні принципи та практики застосування. FoxmindEd. URL: <https://foxminded.ua/shcho-take-rest-api/> (дата звернення: 23.05.2025).

18. Zebra Connect - AMR solution with shelf trolleys. Expert for Autonomous Mobile Robots - AMR Solutions. URL: <https://log-robot.com/en/amr-products/zebra-mobile-robots/zebraconnect> (дата звернення: 29.05.2025).

19. CartConnect від Zebra Robotics Automation. Piedmont National. URL: <https://piedmontnational.com/wp-content/uploads/2020/11/CartConnect100.jpg> (дата звернення: 01.06.2025).

20. Mohammed B. Enhance Warehouse Efficiency: Oracle WMS Integrations with Oracle Integration Cloud (OIC). Medium. URL: <https://medium.com/@m.baig162/enhance-warehouse-efficiency-oracle-wms-integrations-with-oracle-integration-cloud-oic-4312975f4002> (дата звернення: 01.06.2025).

21. The power of goods-to-person warehouse automation. Element Logic UK. URL: <https://www.elementlogic.net/uk/insights/goods-to-person-warehouse-automation/> (дата звернення: 02.06.2025).

22. І.Ш.Невлюдов, О.В.Токарєва. Теорія автоматичного управління (Збірник задач). Харків: ХНУРЕ, 2020. 240 с.