

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

 Черно О.О.
«16» 06 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

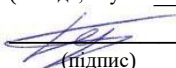
на тему: «Автоматизована система складської логістики»

Виконав: студент 4341 групи

 **Ляхов В.О.**
(підпис)

Керівник роботи:

доцент кафедри КСУ, к.т.н., доцент
(посада, науковий ступень вчене звання)

 **Герасін О.С.**
(підпис)

м. Миколаїв – 2025 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ННІ автоматики та електротехніки
Кафедра комп'ютеризованих систем управління
Рівень вищої освіти бакалавр

Спеціальність **151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології**
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри КСУ
 **Черно О.О.**
«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Ляхову В'ячеславу Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: *Автоматизована система складської логістики*

керівник роботи Герасін Олександр Сергійович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "23" квітня 2025 р. № УЧ-343

2. Строк подання студентом роботи 09.06.2025

3. Вихідні дані до роботи *Розробити систему автоматизації складу на основі AGV-роботів та технології RFID*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз сучасних технологій автоматизації процесів складських логістики

Розробка автоматизованої системи складської логістики

Тестування запропонованої системи автоматизації складських операцій

Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

<i>Актуальність, мета та задачі роботи</i>
<i>Склади, які використовують AGV-роботів</i>
<i>Апаратне забезпечення складу. AGV-робот</i>
<i>Апаратне забезпечення складу. RFID зчитувачі</i>
<i>Програмне забезпечення складу</i>
<i>Схема складського приміщення</i>
<i>Тестування складу в емуляторі</i>
<i>Аналіз ефективності системи</i>
<i>Висновки</i>

6. Консультанти розділів роботи

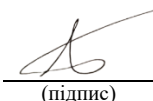
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Герасін О.С., доцент каф. КСУ</i>	20.05.2025	30.05.2025

7. Дата видачі завдання: «03» березня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів підготовки кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Аналіз сучасних технологій автоматизації процесів складських логістики</i>	18.04.2025	виконано
2	<i>Розробка автоматизованої системи складської логістики</i>	05.05.2025	виконано
3	<i>Тестування системи автоматизації</i>	20.05.2025	виконано
4	<i>Охорона праці</i>	30.05.2025	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2025	виконано

Студент


(підпис)

Ляхов В.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Герасін О.С.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Обсяг кваліфікаційної роботи становить 76 сторінок, у роботі наведено 22 рисунки, 1 таблиця та використано 14 джерела.

Дана робота присвячена розробці, тестуванню та аналізу автоматизованої системи складської логістики на базі AGV-роботів і технології RFID. У роботі проведено всебічний аналіз сучасних технологій автоматизації складських операцій, включаючи системи управління складом (WMS), автоматизовані системи зберігання та вилучення (AS/RS), конвеєрні та сортувальні системи, а також технології AGV і RFID. Розроблено автоматизовану систему з використанням AGV-робота MiR250, RFID-сканера Zebra FX9600 та програмного забезпечення SAP EWM, що забезпечує інтеграцію та аналітику в реальному часі. Проведено комп'ютерне моделювання в Anylogic для оптимізації конфігурації системи, тестування RFID-взаємодії та аналіз ефективності. Розглянуто аспекти охорони праці, включаючи механічні ризики від AGV та радіочастотне випромінювання RFID, та запропоновано заходи для їх мінімізації.

Ключові слова: автоматизація, складська логістика, AGV-робот, RFID-технологія, SAP EWM, Anylogic.

ABSTRACT

The scope of the qualifying work is 76 pages, including 22 figures, 1 table, and 14 references.

This work is dedicated to the development, testing, and analysis of an automated warehouse logistics system based on AGV robots and RFID technology. The study includes a comprehensive analysis of modern warehouse automation technologies, such as warehouse management systems (WMS), automated storage and retrieval systems (AS/RS), conveyor and sorting systems, as well as AGV and RFID technologies. An automated system was developed using the MiR250 AGV robot, Zebra FX9600 RFID scanner, and SAP EWM software, which ensures integration and real-time analytics. Computer modeling in Anylogic was conducted to optimize the system's configuration with testing of RFID interactions and efficiency analysis performed. Occupational safety aspects were addressed, including mechanical risks from AGVs and radiofrequency radiation from RFID, with proposed measures to mitigate these risks.

Keywords: automation, warehouse logistics, AGV-robot, RFID-technology, SAP EWM, Anylogic.

Зміст

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ СКЛАДСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ	8
1.1 Поняття автоматизованих складських систем.	8
1.2 Аналіз існуючих рішень автоматизації складських операцій	10
1.3 Використання AGV-роботів у логістичних процесах	13
1.4 Технологія RFID та її застосування в логістиці.....	18
Висновки до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СКЛАДСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ	23
2.1. Вибір апаратного забезпечення системи	23
2.2. Програмні засоби для управління складською системою	33
2.3 Особливості RFID-взаємодії у системі	38
2.4 Архітектура автоматизованої системи складської логістики.....	42
Висновки до розділу 2	48
РОЗДІЛ 3 ТЕСТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ	50
3.1. Комп'ютерне моделювання функціонування системи складської логістики з AGV-роботом.....	50
3.2. Тестування операцій оновлення вмісту бази даних при RFID-взаємодії .	53
3.3. Аналіз ефективності роботи системи.....	59
Висновки до розділу 3	64
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	65
4.1. Загальні поняття охорони праці.	65
4.2. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на оператора автоматизованої системи складської логістики.....	67
4.3. Заходи з техніки безпеки для зменшення або усунення впливу шкідливих факторів при обслуговуванні автоматизованої системи складської логістики.	70
Висновки до розділу 4	71
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку логістики та складських операцій вимагають підвищення ефективності процесів зберігання та переміщення вантажів. Традиційні методи управління складами, що базуються на ручному управлінні та частковій механізації, не відповідають сучасним вимогам швидкості, точності та оптимального використання ресурсів. Це зумовлює зростання потреби у впровадженні автоматизованих систем складської логістики, які дозволяють мінімізувати людський фактор, знизити експлуатаційні витрати та підвищити продуктивність.

Одним із ключових напрямів автоматизації складів є використання AGV-роботів (автономних мобільних роботів) для транспортування вантажів у поєднанні з технологією RFID (радіочастотної ідентифікації), що забезпечує швидке та точне відстеження товарів. Поєднання цих технологій дає змогу суттєво підвищити ефективність складських операцій, мінімізувати втрати, а також оптимізувати використання складських площ.

Актуальність дослідження визначається зростаючою потребою підприємств у підвищенні конкурентоспроможності та зменшенні витрат, пов'язаних із логістикою. Впровадження автоматизованих систем управління складом на основі AGV і RFID дозволяє досягти значного покращення у швидкості обробки замовлень, точності інвентаризації та оптимізації логістичних процесів.

Дана робота присвячена аналізу методів оптимізації процесів зберігання та переміщення вантажів із використанням AGV-роботів і RFID-технологій, а також розробці концепції автоматизованої системи складської логістики, що відповідає сучасним вимогам ефективності та надійності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ СКЛАДСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ

1.1 Поняття автоматизованих складських систем.

Автоматизовані складські системи (АСС) – це комплексні технологічні рішення, які поєднують апаратне забезпечення (роботизовані платформи, конвеєри, автоматичні стелажі), програмне забезпечення (системи управління складом, аналітичні платформи) та організаційні методи для підвищення ефективності логістичних процесів на складах [15]. Їхня головна мета – зменшити залежність від ручної праці, оптимізувати використання складських площ і прискорити виконання операцій, таких як приймання, розміщення, комплектація та відвантаження товарів. АСС включають широкий спектр технологій: від простих автоматичних сканерів до складних систем із застосуванням штучного інтелекту, безпілотників і датчиків Інтернету речей (IoT), що робить їх ключовим інструментом сучасної логістики.

Історія розвитку АСС сягає середини ХХ століття, коли зростання промислового виробництва та торгівлі вимагало нових підходів до управління вантажопотоками. У 1950-х роках у США на заводах Ford почали використовувати перші конвеєрні системи для транспортування матеріалів між цехами, що стало прообразом автоматизації складів. У 1970-х з'явилися перші комп'ютеризовані системи управління запасами, які дозволяли відстежувати товари в реальному часі. У 1990-х роках почали впроваджувати роботизовані крани-штабелери для висотних складів, а з 2000-х технології АСС досягли нового рівня завдяки цифровізації та робототехніці. Сьогодні прикладом повної автоматизації є склади Amazon у США, де понад 300 000 роботів Kiva Systems переміщують стелажі зі швидкістю 1,7 м/с, обробляючи до 2 млн замовлень на день під час розпродажів, таких як "Чорна п'ятниця". Ці роботи координуються системою штучного інтелекту, яка оптимізує маршрути та прогнозує попит.

АСС поділяються на кілька типів залежно від рівня автоматизації. Повна автоматизація передбачає заміну всіх ручних операцій машинами та

програмними комплексами. Наприклад, на складах Tesla у Китаї роботи, конвеєри та автоматичні стелажі виконують 98% завдань, а люди лише контролюють процеси. Часткова автоматизація зосереджена на окремих етапах, таких як транспортування чи сканування. В Україні часткова автоматизація є більш поширеною через менші витрати та простоту впровадження. Так, "Нова Пошта" у 2024 році встановила автоматичні сканери та конвеєри на терміналі в Одесі, що прискорило обробку посилок на 35%. За даними Європейської асоціації логістики (ELA, 2024), у розвинених країнах частка повністю автоматизованих складів сягає 20%, тоді як в Україні – лише 2%, що пояснюється економічними обмеженнями та недостатньою інфраструктурою.

Переваги АСС очевидні. По-перше, швидкість: автоматичні системи скорочують час обробки замовлення з 2-3 годин до 5-15 хвилин. По-друге, точність: помилки, пов'язані з людським фактором, зменшуються з 4-6% до 0,05%. По-третє, економія простору: висотні стелажі дозволяють збільшити щільність зберігання на 80%. Наприклад, логістичний центр ІКЕА у Нідерландах використовує автоматичні стелажі заввишки 40 м, що дало змогу розмістити на 60% більше товарів на тій самій площі. Екологічний ефект також значний: за даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA, 2024), АСС скорочують викиди CO₂ на 25% завдяки енергоефективним технологіям і оптимізації логістики.

Проте впровадження АСС супроводжується труднощами. Початкові витрати високі: автоматизація складу площею 20 000 м² коштує \$3-7 млн, включаючи обладнання, програмне забезпечення та інфраструктуру. В Україні до цього додаються проблеми з доступом до фінансування: ставки за кредитами у 2025 році становлять 18-22%, що ускладнює інвестиції для малого та середнього бізнесу. Технічне обслуговування також дороге: заміна одного робота чи конвеєрного модуля коштує \$20-80 тис., а підготовка інженерів триває 6-18 місяців. Соціальний аспект не менш важливий: за оцінками Міжнародної організації праці (ILO, 2024), до 2035 року автоматизація може замінити до 45%

низькокваліфікованих працівників у логістиці, що потребуватиме програм перекваліфікації.

В Україні АСС поступово набирають обертів. Наприклад, "Rozetka" у 2024 році відкрила склад із частковою автоматизацією в Дніпрі, де конвеєри та WMS скоротили час комплектації з 25 до 8 хвилин. Малий бізнес частіше використовує прості рішення, як-от ручні сканери чи базові WMS, через обмежений бюджет. Перспективи розвитку АСС в Україні пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту для прогнозування попиту, впровадженням 5G для швидшого обміну даними та використанням альтернативних джерел енергії, таких як сонячні панелі чи водневі батареї, які вже тестуються в Європі та Японії.

1.2 Аналіз існуючих рішень автоматизації складських операцій

Сучасний ринок пропонує різноманітні рішення для автоматизації складів, які можна класифікувати за типом технологій, масштабом і вартістю. Ці рішення постійно вдосконалюються завдяки прогресу в робототехніці, штучному інтелекті та хмарних технологіях. Розглянемо основні категорії детальніше.

Системи управління складом (WMS). WMS (Системи управління складом) – це програмне забезпечення, яке є "цифровим мозком" автоматизованого складу [1, 2, 4]. Воно координує всі процеси: від приймання товарів до їхнього відвантаження, відстежує запаси в реальному часі, оптимізує розміщення (наприклад, за принципом ABC, де 20% найпопулярніших товарів розміщуються ближче до зони комплектації), планує маршрути для працівників чи роботів і генерує аналітичні звіти. Сучасні WMS, такі як SAP Extended Warehouse Management або Oracle WMS, підтримують хмарні технології, машинне навчання та голосове управління. Наприклад, у логістичному центрі Tesco у Великобританії WMS із голосовими командами скоротило час комплектації з 12 до 4 хвилин, оскільки оператори отримують інструкції через навушники, минаючи ручні сканери.

В Україні WMS застосовуються як великими компаніями, так і малим бізнесом. "Fozzy Group" у 2024 році впровадило WMS від Manhattan Associates

на складі в Києві, що підвищило точність запасів до 99,7% і скоротило надлишки на 15%. Локальні рішення, як-от "1С:Склад" або "BAS Управління торгівлею", коштують від 100 000 грн і популярні серед середніх підприємств завдяки адаптації до місцевих стандартів бухгалтерського обліку. За даними Gartner (2024), 65% складів у світі використовують WMS, а до 2030 року цей показник зросте до 90% через бум онлайн-торгівлі. Схема представлена на рис.1.1.



Рис. 1.1 – Система управління складом WMS

AS/RS (Automated Storage and Retrieval Systems) – це високотехнологічні рішення для складів із великою висотою (до 50 м), які включають крани-штабелери (вантажопідйомність до 3,5 тонн, швидкість до 5 м/с), автоматичні стелажі та конвеєри (рис 1.2.) [11]. Вони ідеально підходять для щільного зберігання: наприклад, система від Dematic у центрі PepsiCo в Італії розміщує 60 000 палет на площі 25 000 м², тоді як традиційний склад умістив би лише 35 000. Технічні параметри вражають: крани працюють із точністю до 1 мм, а цикл переміщення палети займає 15-25 секунд.

У Європі AS/RS широко застосовуються в автомобільній і фармацевтичній галузях. Наприклад, склад Volkswagen у Німеччині використовує AS/RS для зберігання 120 000 деталей із доступом до будь-якої позиції за 10 секунд. В Україні такі системи поки рідкісні через високу вартість (\$2-5 млн), але "АТБ" планує встановити AS/RS на новому складі в Полтаві у 2026 році для оптимізації зберігання продуктів із коротким терміном придатності. Недоліки включають залежність від електропостачання (перебої зупиняють роботу) і потребу в імпортних комплектуючих, що ускладнює ремонт в умовах логістичних обмежень.



Рис.1.2 Конвеєрні та сортувальні системи

Конвеєри автоматизують транспортування товарів, перевозячи до 25 000 одиниць на годину на відстань до 3 км. Вони бувають стрічковими (для легких коробок), роликowymi (для палет) і модульними (для змішаних вантажів). Сортувальні системи, такі як cross-belt або tilt-tray, розподіляють товари зі швидкістю до 35 000 одиниць на годину і точністю 99,99%. У хабі DHL у

Сінгапурі сортувальна лінія довжиною 4 км обробляє 1,5 млн посилок за добу, інтегруючись із WMS і дронами для моніторингу.

В Україні "Нова Пошта" у 2024 році встановила сортувальник із пропускною здатністю 12 000 одиниць на годину на терміналі в Львові, що скоротило час обробки на 55%. Конвеєри потребують регулярного обслуговування (заміна стрічки кожні 12-18 місяців коштує 50-100 тис. грн) і стабільного живлення, що є проблемою в регіонах із частими відключеннями електроенергії.

Окрім AGV, популярність набирають автономні мобільні роботи (AMR), які використовують штучний інтелект для навігації без фіксованих маршрутів. Наприклад, робот Fetch Robotics із вантажопідйомністю 100 кг і швидкістю 2,5 м/с застосовує LIDAR і камери для доставки товарів зі швидкістю 250 одиниць на годину. У логістиці Alibaba в Китаї AMR скоротили час комплектації на 75%. Дрони також входять у вжиток: у складі Walmart у Канаді дрони зі сканерами перевіряють запаси на висоті до 25 м, зчитуючи 2000 одиниць за хвилину.

В Україні роботизовані платформи використовуються обмежено. "Укрпошта" тестує AMR для транспортування посилок усередині терміналів, але ціна (\$150 тис. за одиницю) стримує масове впровадження. За прогнозами PwC (2025), до 2030 року AMR і дрони займатимуть 30% ринку складської автоматизації в розвинених країнах.

1.3 Використання AGV-роботів у логістичних процесах

AGV (Automated Guided Vehicles) – це автономні транспортні засоби, які відіграють ключову роль у автоматизації внутрішньої логістики складів, замінюючи традиційні вилкові навантажувачі та ручні візки [17]. Ці роботи призначені для переміщення вантажів – від невеликих коробок вагою 10 кг до палет масою до 3 тонн – усередині складських приміщень за заздалегідь визначеними маршрутами. AGV оснащені комплексом сенсорів (лазерні, ультразвукові, інфрачервоні), камерами високої роздільної здатності, системами GPS (для зовнішнього використання) та акумуляторами – зазвичай літій-

іонними, хоча в деяких випадках застосовуються водневі батареї. Наприклад, модель AGV від німецької компанії Jungheinrich (рис.1.3.) із вантажопідйомністю 2,5 тонни рухається зі швидкістю до 2,5 м/с, має точність позиціонування до 1 см і зупиняється за 0,02 секунди при виявленні перешкоди завдяки вбудованим датчикам безпеки.



Рис. 1.3. Модель AGV від німецької компанії Jungheinrich

Історія AGV бере початок у 1950-х роках, коли американська компанія Barrett Electronics розробила перші "безпілотні візки" для транспортування вантажів на заводах. Ці ранні моделі рухалися вздовж дротів, вбудованих у підлогу, і мали обмежену функціональність. У 1980-х роках з'явилися магнітні стрічки та лазерна навігація, що підвищило їхню точність і гнучкість. Сьогодні AGV досягли нового рівня завдяки інтеграції з системами штучного інтелекту та Інтернету речей (IoT). Наприклад, у логістичному центрі Siemens у Швейцарії флот із 200 AGV координується через хмарну платформу, яка в реальному часі оптимізує маршрути залежно від поточного завантаження складу.

Основні функції AGV у логістичних процесах

Транспортування товарів: AGV перевозять вантажі між зонами складу – від доків приймання до стелажів, від стелажів до сортувальних ліній чи зон пакування. У логістичному центрі Toyota у Японії AGV доставляють

автозапчастини до виробничих ліній із частотою 500 циклів на день, що забезпечує безперебійне постачання. У середньому один робот перевозить до 10 тонн вантажу за зміну, що еквівалентно роботі 3-4 працівників із навантажувачами.

Комплектація замовлень: у системі "goods-to-person" (товари до людини) AGV підвозять стелажі чи контейнери з товарами до робочих станцій, де оператори їх упаковують. На складах Adidas у Бельгії ця технологія скоротила час комплектації одного замовлення з 18 до 2 хвилин, підвищивши продуктивність на 65%. Наприклад, робот може одночасно транспортувати стелаж із 50 коробками, тоді як працівник вручну переніс би лише 2-3 за один раз.

Інвентаризація: деякі моделі AGV, як-от від американської компанії Seegrid, оснащені сканерами штрих-кодів і RFID-зчитувачами, які дозволяють автоматично оновлювати дані про запаси під час руху. У центрі Walmart у Техасі AGV сканують до 10 000 одиниць товару за годину, передаючи інформацію в WMS кожні 3 хвилини, що усуває потребу в ручній інвентаризації.

Підтримка сортування: AGV можуть доставляти вантажі до сортувальних систем, оптимізуючи їхню роботу. У хабі UPS у Кентуккі роботи транспортують коробки до конвеєрів зі швидкістю 300 одиниць на годину, що скорочує затримки в пікові періоди.

Переваги AGV численні. По-перше, цілодобова робота: роботи функціонують 24/7 із перервами лише на зарядку (1-2 години для літій-іонних батарей або 10 хвилин для водневих). По-друге, безпека: сенсори та системи аварійного гальмування знижують ризик аварій на 85% порівняно з традиційними навантажувачами. По-третє, економія: витрати на робочу силу скорочуються на 40-50%, а повернення інвестицій (ROI) досягається за 2-3 роки. У логістичному центрі Audi в Угорщині флот із 150 AGV скоротив час внутрішнього транспортування з 30 до 7 хвилин, знизивши витрати на логістику на 28%. В Україні прикладом є склад "Епіцентр" у Черкасах, де у 2024 році 20

AGV зменшили витрати на персонал на 25% і прискорили доставку товарів до магазинів на 18%.

Проте AGV мають і недоліки. Висока початкова вартість – один робот коштує від 70 000 до 250 000 доларів, а підготовка інфраструктури (магнітні стрічки, датчики, Wi-Fi) додає ще 20-30% до витрат. Наприклад, прокладання магнітної стрічки коштує 400-600 грн за метр, а для складу площею 10 000 м² потрібно щонайменше 1-2 км таких ліній. Залежність від стабільного електропостачання також є проблемою: у разі відключення роботи зупиняються, що особливо актуально для України з її частими перебоями. Обмежена гнучкість – ще один мінус: AGV прив'язані до фіксованих маршрутів, і зміна їхньої траєкторії потребує 1-3 днів переналаштування, тоді як автономні мобільні роботи (AMR) адаптуються миттєво. У порівнянні з AMR, які коштують від 120 000 доларів, але використовують AI для динамічної навігації, AGV менш універсальні, хоча й дешевші в експлуатації для стандартних завдань.

В Україні AGV застосовуються переважно великими підприємствами. Наприклад, "Нова Пошта" у 2024 році впровадила 12 AGV на термінали в Харкові для транспортування габаритних посилок, що прискорило обробку на 30%. "АТБ" використовує AGV для доставки палет із продуктами до зони відвантаження, скоротивши час із 15 до 5 хвилин. Малий бізнес поки уникає таких рішень через високу ціну та складність інтеграції, хоча локальні компанії, як-от "КМЗ" (Київський механічний завод), почали розробляти бюджетні аналоги AGV вартістю 1-2 млн грн.

Технічні характеристики AGV варіюються залежно від моделі. Наприклад, AGV від шведської компанії ABB мають вантажопідйомність до 3 тонн, швидкість до 2,8 м/с і автономність до 18 годин завдяки літій-іонним батареям ємністю 48 кВт·год. Моделі від Mobile Industrial Robots (MiR) оснащені водневими батареями, які заряджаються за 15 хвилин і забезпечують до 24 годин роботи. Точність позиціонування досягає 0,5 мм завдяки комбінації лазерних сканерів і камер із роздільною здатністю 4K. У порівнянні з традиційними

навантажувачами (швидкість до 1,5 м/с, вантажопідйомність до 2 тонн), AGV виграють у продуктивності та безпеці, але поступаються в маневреності на нерівних поверхнях.

Порівняння AGV із конкурентами показує їхню специфіку. Наприклад, вилкові навантажувачі коштують 500 000-1 млн грн, але потребують оператора, тоді як AGV працюють автономно. AMR, такі як Boston Dynamics Stretch (вантажопідйомність 50 кг, ціна 150 000 доларів), перевершують AGV у гнучкості, але програють у вантажопідйомності. Конвеєри, хоч і дешевші (200-300 тис. грн за 10 м), не можуть транспортувати вантажі в динамічних умовах. За даними McKinsey (2024), до 2035 року AMR витіснять AGV у 75% складів через їхню адаптивність, але AGV залишаться стандартом для стабільних потоків, як-от у виробничій логістиці.

Перспективи розвитку AGV пов'язані з технологічними інноваціями. Інтеграція з 5G (швидкість передачі даних до 25 Гб/с) дозволяє керувати флотом із сотень роботів у реальному часі. У Кореї тестуються AGV із сонячними панелями, які генерують до 20% енергії, подовжуючи автономність до 36 годин. Водневі батареї, які вже застосовуються в Японії, скорочують час зарядки до 5 хвилин і збільшують термін служби до 10 років. У 2024 році Gartner прогнозував, що до 2030 року 30% AGV матимуть гібридну навігацію (фіксовані маршрути + AI), що зробить їх конкурентами AMR. В Україні "Укрпошта" планує пілотний проєкт із AGV на водневих батареях у 2027 році, а "Rozetka" тестуватиме моделі з 5G-управлінням на складі в Борисполі у 2026 році. Ці інновації можуть знизити залежність від інфраструктури та зробити AGV доступнішими для середнього бізнесу.

Виклики впровадження AGV включають не лише фінансові, а й організаційні аспекти. Наприклад, у країнах із низькою кваліфікацією персоналу, як Україна, підготовка операторів для роботи з AGV займає 3-6 місяців і коштує 50-100 тис. грн на людину. Кібербезпека також є проблемою: злом системи управління може зупинити весь флот, що вже траплялося в 2023 році на складі

DHL у Нідерландах. У глобальному масштабі AGV стають частиною "розумних складів", де вони інтегруються з WMS, IoT і дронами, створюючи екосистему для обробки мільйонів замовлень щодня.

1.4 Технологія RFID та її застосування в логістиці

RFID (Radio Frequency Identification) – це технологія безконтактної ідентифікації, яка використовує радіочастотні сигнали для зчитування даних із міток, прикріплених до товарів, палет чи тари [8]. Система складається з трьох основних компонентів: міток (тегів), зчитувачів і програмного забезпечення для обробки даних. Мітки бувають пасивними (живляться від сигналу зчитувача, дальність 1-20 м, ціна 5-50 грн) і активними (з батареєю, дальність до 300 м, ціна 800-2500 грн). Зчитувачі варіюються від портативних моделей за 15 000 грн до стаціонарних порталів за 300 000 грн, обробляючи до 2500 тегів за секунду на частотах 125 кГц (LF), 13,56 МГц (HF) або 860-960 МГц (UHF).

Історія RFID почалася в 1940-х роках, коли технологію розробили для ідентифікації літаків під час Другої світової війни. У логістиці RFID почали застосовувати в 1980-х, коли Walmart у США протестував мітки для відстеження палет. Справжній прорив стався в 2000-х із появою дешевих пасивних тегів і стандартів EPC Gen2, які уніфікували частоти та протоколи. Сьогодні RFID є стандартом для великих логістичних операторів: наприклад, у центрі Amazon у Німеччині RFID відстежує 10 млн одиниць товару щомісяця, забезпечуючи точність запасів на рівні 99,98%. Приклад застосування RFID представлений на рис. 1.4.

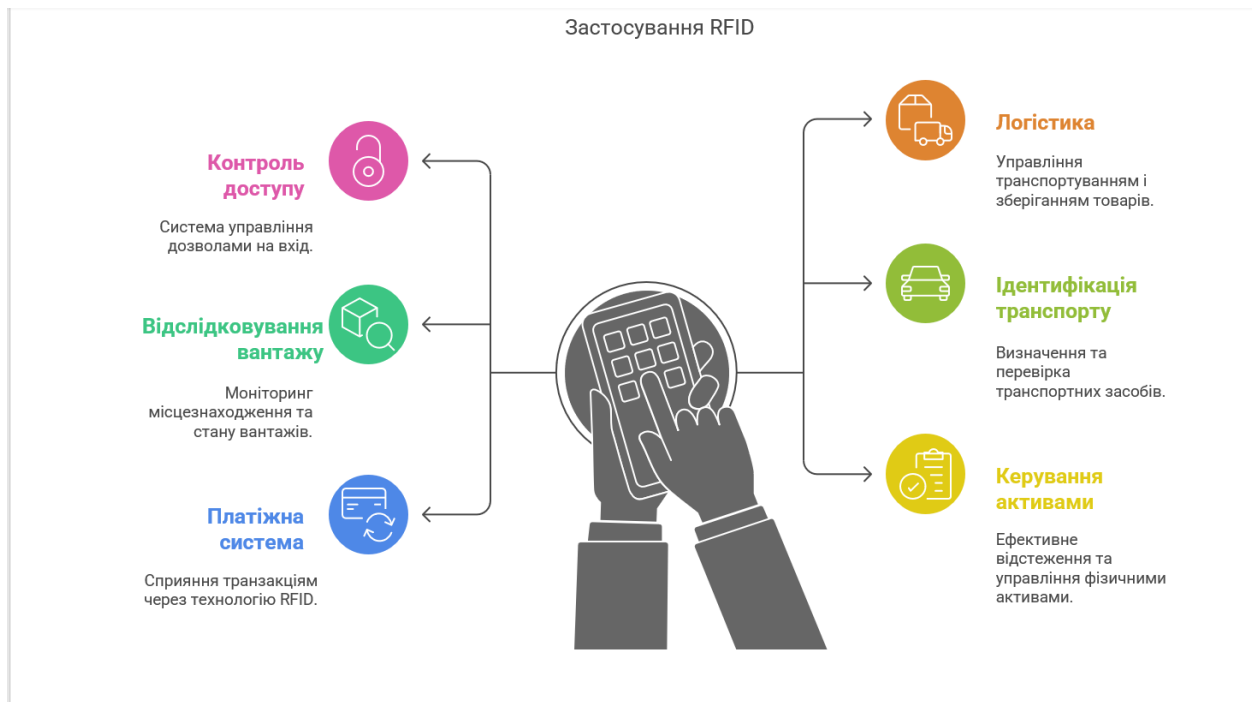


Рис.1.4. Застосування RFID

Застосування RFID у складській логістиці

Інвентаризація: RFID дозволяє швидко перевіряти запаси без зупинки роботи складу. У мережі Target у США портативний зчитувач із дальністю 10 м сканує 15 000 одиниць товару за 30 хвилин, тоді як ручна інвентаризація тривала б 3-4 дні. У центрі Zara в Іспанії RFID скоротило час перевірки з 5 днів до 10 годин, підвищивши точність до 99,9%.

Контроль переміщень: RFID-ворота, встановлені в зонах приймання, зберігання та відвантаження, автоматично реєструють рух товарів із точністю до 0,03 секунди. У логістиці DHL у Китаї це зменшило втрати від крадіжок на 35% і прискорило обробку вантажів на 40%. Наприклад, одна палета з 100 коробками сканується за 2 секунди, тоді як штрих-коди потребували б 5-7 хвилин.

Управління зворотною тарою: RFID відстежує палети, контейнери та тару, оптимізуючи їхнє повторне використання. У IKEA у Швеції мітки на 50 000 палетах скоротили втрати тари на 20% і знизили витрати на логістику на 12%. В Україні "Метро" у 2024 році почало використовувати RFID для відстеження пластикових ящиків, що зменшило їхню заміну на 15%.

Контроль умов зберігання: активні теги з датчиками температури, вологості чи вібрації застосовуються для товарів із особливими вимогами. У

фармацевтичній компанії Novartis теги відстежують вакцини з похибкою 0,01°C, передаючи дані в WMS кожні 10 секунд. У логістиці Nestlé RFID контролює шоколад, запобігаючи псуванню через перепади температури.

Оптимізація ланцюга постачання: RFID забезпечує прозорість від виробництва до кінцевого споживача. У центрі Nike у В'єтнамі мітки відстежують взуття на всіх етапах, скорочуючи час доставки до магазинів із 10 до 3 днів.

Переваги RFID очевидні [16]. По-перше, масове зчитування: на відміну від штрих-кодів, які скануються по одному, RFID обробляє до 3000 тегів одночасно без прямої видимості. По-друге, швидкість: інвентаризація складу площею 10 000 м² займає 1-2 години замість 2-3 днів. По-третє, точність: помилки падають із 2-3% до 0,02%. У логістичному центрі H&M у Швеції RFID підвищило швидкість обробки повернень із 1 години до 8 хвилин, а в "Сільпо" в Україні скоротило списання молочної продукції на 18% завдяки точному відстеженню термінів придатності.

Недоліки RFID також суттєві. Висока вартість – пасивні теги коштують 5-50 грн, активні – 800-2500 грн, а зчитувачі – від 15 000 до 500 000 грн залежно від дальності та потужності. Для складу з 100 000 одиниць товару витрати на мітки сягають 500 000-1 млн грн, що невідомо для малого бізнесу. Перешкоди від металевих поверхонь чи рідин знижують дальність зчитування на 50-70%: наприклад, у ящиках із водою сигнал слабшає до 2-3 м. Потреба в стандартизації ускладнює глобальне використання: частоти UHF у США (902-928 МГц) відрізняються від європейських (865-868 МГц), що вимагає адаптації обладнання. У порівнянні зі штрих-кодами (ціна 0,1-0,5 грн за етикетку) RFID дорожча, але виграє в швидкості та автоматизації.

В Україні RFID набирає популярності серед великих ритейлерів. "Епіцентр" у 2024 році впровадив мітки для відстеження будівельних матеріалів, підвищивши точність запасів до 99,5%. "Нова Пошта" тестує RFID на сортувальних терміналах для контролю посилок, скоротивши помилки доставки на 10%. Малий бізнес уникає технології через витрати, хоча локальні виробники,

як-от "Електронмаш" у Львові, пропонують бюджетні теги за 3-5 грн, що може змінити ситуацію в майбутньому.

Технічні характеристики RFID залежать від типу обладнання. Пасивні теги мають пам'ять від 96 біт до 8 КБ, активні – до 64 КБ, що дозволяє зберігати дані про товар (артикул, партію, термін придатності). Зчитувачі типу Impinj Speedway обробляють до 2500 тегів за секунду з дальністю 15 м, тоді як портативні моделі від Zebra (дальність 5 м) коштують 20 000 грн і зчитують 500 тегів за секунду. У порівнянні з QR-кодами (сканування до 50 одиниць за хвилину) RFID значно продуктивніша, але потребує складнішої інфраструктури.

Перспективи розвитку RFID вражають. Інтеграція з IoT дозволяє створювати "розумні" теги, які відстежують температуру, вологість і вібрацію в реальному часі. У 2024 році Amazon представив концепцію складу, де RFID-теги передають дані про стан товарів через 5G із затримкою 1 мс. Блокчейн також набирає обертів: у 2025 році DHL планує пілотний проєкт, де мітки фіксуватимуть ланцюг постачання в децентралізованій базі, забезпечуючи 100% прозорість. У фармацевтиці RFID із датчиками тиску тестується для контролю цілісності упаковок, що важливо для дорогих ліків. В Україні "Фармак" планує впровадити такі теги у 2026 році для відстеження медикаментів.

Виклики впровадження RFID включають кібербезпеку: злом зчитувачів може призвести до витоку даних, як сталося в 2022 році на складі Carrefour у Франції. Екологічний аспект також актуальний: утилізація мільйонів тегів щороку створює проблему електронних відходів, хоча в Європі вже розробляються біорозкладні мітки з целюлози. У глобальному масштабі RFID стає основою "розумної логістики", де кожна одиниця товару відстежується від заводу до споживача, скорочуючи затримки та підвищуючи якість обслуговування.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз сучасних технологій автоматизації складської логістики демонструє їхній величезний потенціал для трансформації логістичних

процесів. Автоматизовані складські системи поєднують в собі апаратні та програмні рішення, дозволяючи оптимізувати використання ресурсів, підвищувати швидкість і точність операцій, а також знижувати операційні витрати. Існуючі технології, такі як WMS, AS/RS, конвеєри, AGV-роботи та RFID, пропонують різноманітні підходи до автоматизації, які можна адаптувати до потреб конкретного складу – від невеликих локальних об'єктів до масштабних розподільчих центрів.

WMS забезпечує цифрове управління процесами, AS/RS оптимізує зберігання у висотних складах, AGV-роботи прискорюють внутрішнє транспортування, а RFID революціонізує облік і відстеження. Кожна з цих технологій має свої сильні сторони та обмеження, що вимагає ретельного аналізу перед впровадженням. Наприклад, AGV ідеально підходять для стабільних потоків товарів, але поступаються AMR у гнучкості, тоді як RFID є незамінною для масового сканування, але дорогою для малих обсягів. Вибір оптимального рішення залежить від типу товарів, обсягів операцій, фінансових можливостей і стратегічних цілей компанії.

Автоматизація складської логістики є не лише технологічним, але й економічним і соціальним явищем, яке впливає на ринок праці, конкурентоспроможність компаній і задоволеність клієнтів.

Отже, метою роботи є розробка автоматизованої системи складської логістики. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання: вибір апаратного забезпечення системи, програмних засобів, тестування розробленої системи.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СКЛАДСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ

Автоматизація складської логістики є одним із найперспективніших напрямків розвитку сучасних логістичних систем, спрямованим на підвищення продуктивності, зниження операційних витрат, оптимізацію простору та забезпечення високої точності в управлінні запасами. Цей розділ присвячений детальному аналізу розробки автоматизованої системи складської логістики, охоплюючи вибір апаратного забезпечення, програмних засобів, особливості RFID-взаємодії та архітектуру системи. Кожен із цих аспектів розглядається з урахуванням сучасних технологічних тенденцій, реальних прикладів їхнього впровадження, а також викликів і перспектив, які виникають у процесі розробки та експлуатації таких систем. Мета цього розділу – надати всебічне розуміння того, як створюється автоматизована система, здатна відповідати вимогам сучасного бізнесу в умовах глобалізації та швидкого зростання обсягів торгівлі.

2.1. Вибір апаратного забезпечення системи

Для забезпечення ефективної роботи автоматизованої складської логістики необхідно вибрати оптимальну мобільну роботизовану платформу. Враховуючи вимоги до вантажопідйомності, швидкості переміщення, навігаційної автономності, а також інтеграції з RFID, обраний AGV-робот MiR250 зі сканером міток RFID.

Для реалізації системи вибираємо MiR250 від компанії MobileIndustrialRobots (MiR), оснащений RFID-сканером ZebraFX9600 [5, 6, 7, 10]. Цей вибір обґрунтований компактністю робота, його адаптивністю до складських умов та можливістю інтеграції з сучасними технологіями відстеження міток. MiR250 є одним із найпопулярніших автономних мобільних роботів (AMR) у логістиці, який використовується такими компаніями, як Toyota, Siemens та DHL, завдяки своїй гнучкості та ефективності.

Конструкція та структура MiR250. MiR250 — це автономний мобільний робот, призначений для транспортування вантажів у складських приміщеннях. Він належить до категорії AMR (Autonomous Mobile Robots), що відрізняються від традиційних AGV (Automated Guided Vehicles) здатністю динамічно адаптуватися до змін у навколишньому середовищі без фіксованих маршрутів, таких як магнітні стрічки чи дроти. Робот має прямокутну форму з низьким профілем, що дозволяє йому працювати у вузьких проходах (шириною від 80 см) і перевозити вантажі вагою до 250 кг зі швидкістю до 2 м/с.

Розміри: 890 мм (довжина) × 580 мм (ширина) × 352 мм (висота). Компактність дозволяє роботу маневрувати в обмеженому просторі. Вага: 83 кг без вантажу, що забезпечує легкість транспортування та монтажу.

Колеса: чотири колеса з диференціальним приводом, виготовлені з поліуретану високої щільності (твердість 92 ShoreA), стійкого до зносу та ковзання. Діаметр коліс — 200 мм, ширина — 75 мм. Максимальне навантаження на вісь — 150 кг. Колеса підтримують поворот на 360°, що забезпечує високу маневреність (рис.2.1.).

Привід: два електродвигуни потужністю 250 Вт кожен, з крутним моментом 10 Н·м, що дозволяє роботу долати нахили до 5° з повним навантаженням.

Навігаційна система MiR250 використовує комбіновану систему навігації для орієнтації у просторі (рис. 2.2).

Лазерні сканери: два сканери SICK microScan3 (дальність 20 м, кут огляду 360°, роздільна здатність 0,1°), розташовані по діагоналі на верхній частині корпусу. Частота сканування — 50 Гц, точність — ±5 мм.

Ультразвукові датчики: чотири датчики (дальність 2 м, частота 40 кГц), розташовані по кутах корпусу для точного позиціонування у вузьких зонах.

3D-камери: дві камери IntelRealSenseD435 (роздільна здатність 1280×720 , глибина до 10 м, кут огляду $87^\circ \times 58^\circ$), розміщені спереду та ззаду для виявлення перешкод і побудови 3D-карти.

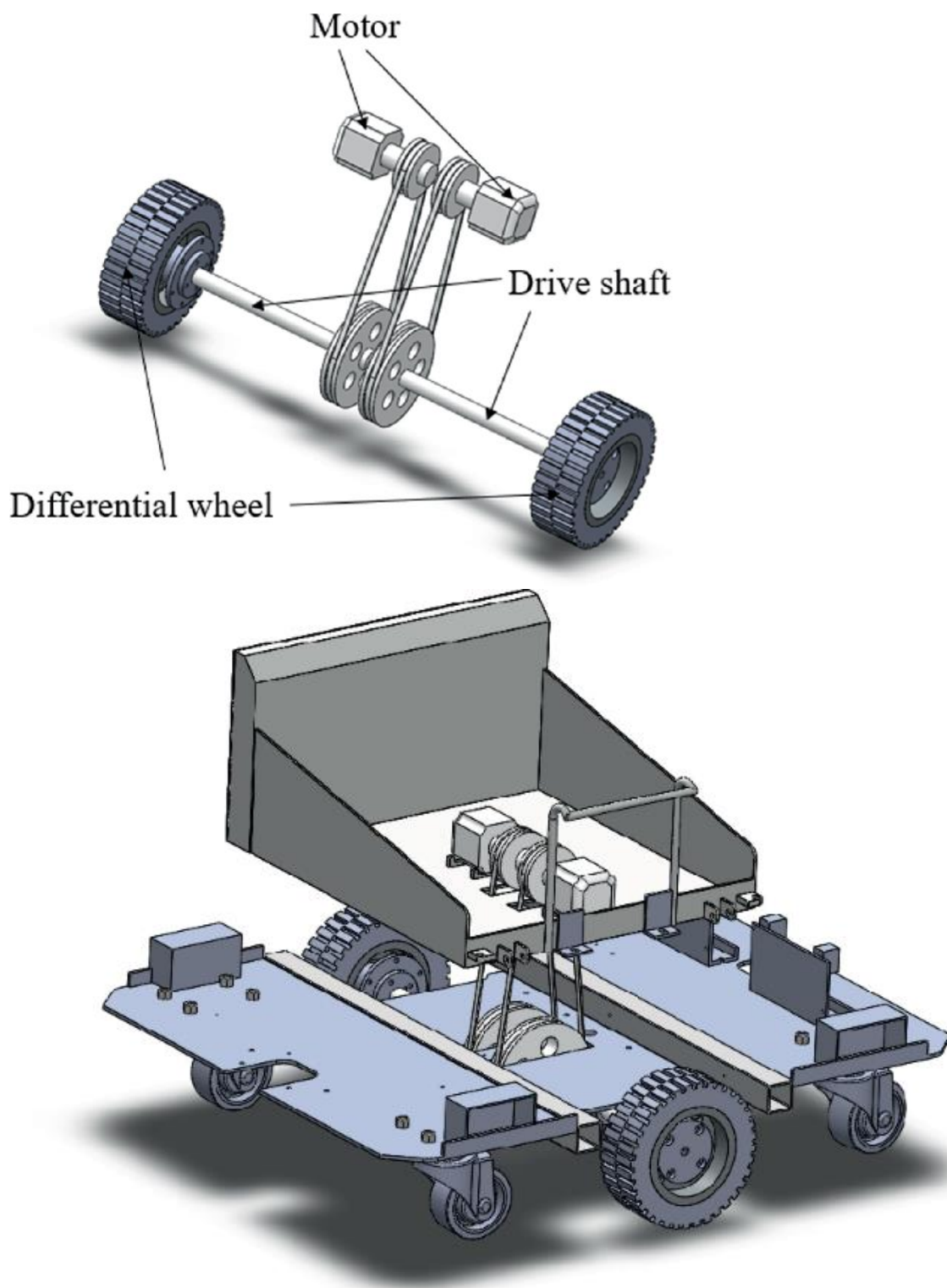


Рис.2.1. Конструкція шасі AGV-робота MiR250

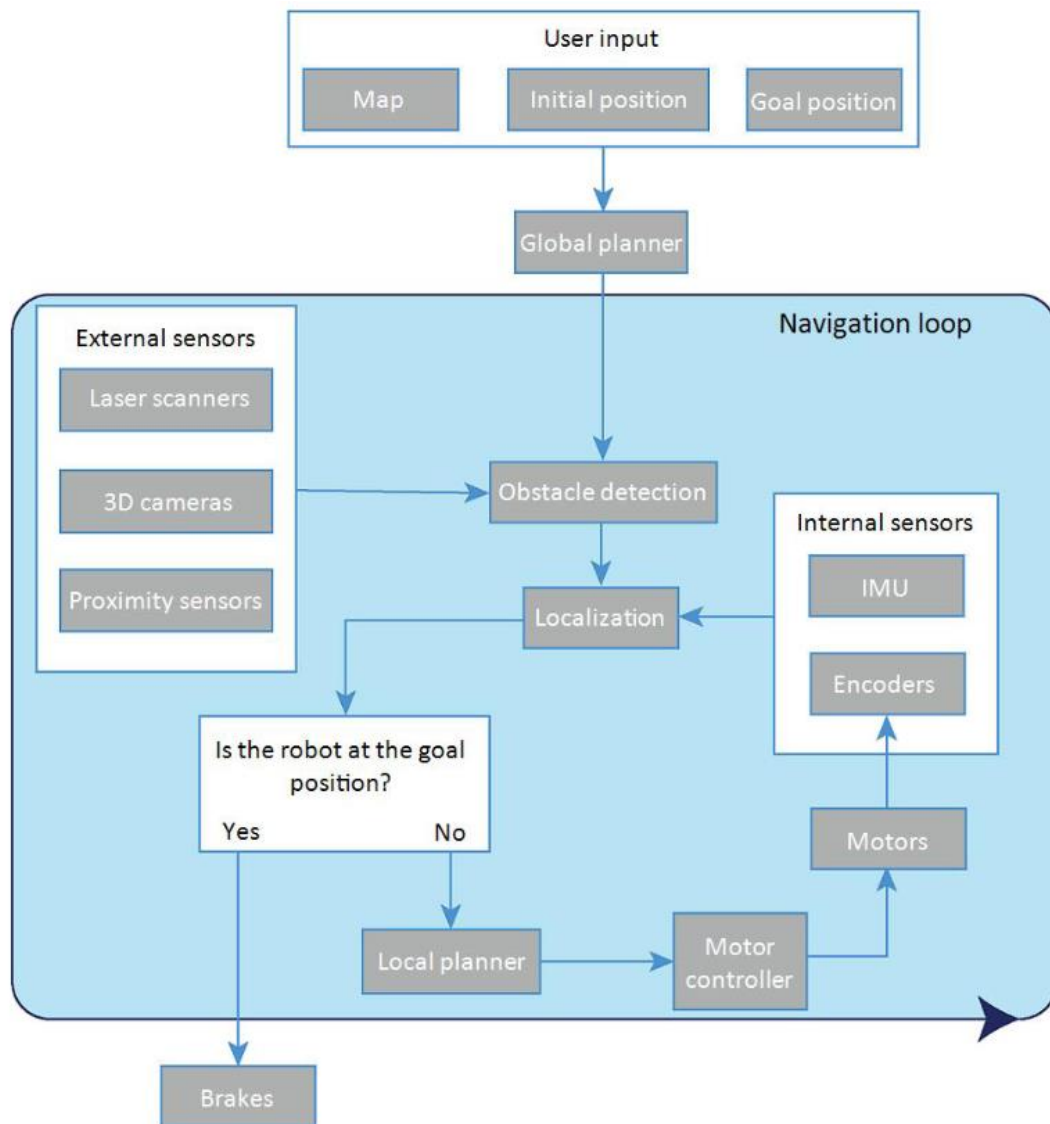


Рис.2.2. Схема навігації робота

Алгоритм навігації базується на SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), який дозволяє роботу створювати карту в реальному часі та визначати своє місце з точністю до 5 мм.

Система живлення. Літій-іонна батарея, 47,5 В, 34,2 А·год, вага 10 кг, розташована в нижній частині корпусу для оптимального розподілу ваги. Їмність забезпечує до 10 годин роботи при повному навантаженні (250 кг) або до 15 годин при половинному (125 кг).

Час зарядки — 2 години до 80% і 3 години до 100% через автоматичну зарядну станцію (вхідна напруга 100-240 В, 50/60 Гц). Робот самостійно

повертається на станцію при рівні заряду 20%. Потужність зарядного пристрою — 600 Вт.

Споживання в режимі очікування становить 50 Вт, у русі — 200-300 Вт залежно від навантаження.



Рис.2.3. Розташування батареї та зарядної станції MiR250.

Вантажопідйомність і модульність. Максимальна вага: 250 кг, що підходить для транспортування стандартних палет (800×1200 мм), коробок або невеликих стелажів.

Платформа: модульна верхня частина (площа 0,5 м²), на яку можна встановити: підйомний механізм (висота підйому до 50 мм, вага 5 кг); конвеєрну стрічку (довжина 800 мм, швидкість 0,5 м/с); роботизовану руку (наприклад, UR5e, вага 20 кг, радіус дії 850 мм). Кріплення: чотири точки фіксації (M10 болти) для надійного утримання вантажу.



Рис.2.4. Модульна платформа MiR250 з вантажем.

Сканер міток: ZebraFX9600 (рис 2.5.). Тип: стаціонарний RFID-сканер UHF-діапазону (860-960 МГц), інтегрований у верхню частину MiR250 через кронштейн (вага 0,8 кг).

Дальність: до 12 м при потужності 33 дБм, регульована від 5 до 33 дБм з кроком 0,1 дБ.

Швидкість: зчитування до 1200 міток за секунду завдяки чотирипортовій антені (роз'єми RP-TNC).

Сумісність: підтримує протоколи EPCGen2v2 та ISO 18000-63, що забезпечує роботу з усіма стандартними RFID-мітками.

Корпус: алюмінієвий, IP52 (захист від пилу та крапель), розміри 191×140×43 мм, вага 0,8 кг.

Живлення: черезPoE (PoweroverEthernet, 15 Вт) або окремий адаптер (24 В, 2 А).



Рис.2.5 RFID-сканер ZebraFX9600

Інтеграція з WMS. MiR250 підключається до системи управління складом (WMS) наступним чином.

Wi-Fi: модуль 2,4/5 ГГц (IEEE 802.11ac), швидкість до 867 Мбіт/с, затримка 10 мс.

Ethernet: порт 1000 Мбіт/с для дротового з'єднання в зонах із перешкодами.

Робот передає інформацію про координати (точність ± 5 мм), статус батареї (у відсотках), виконані завдання (кількість і тип) та зчитані RFID-мітки (EPC-коди) у реальному часі. Протокол передачі — RESTAPI або MQTT.

Технічні характеристики MiR250 наступні.

Розміри: 890×580×352 мм.

Вага: 83 кг.

Швидкість: 2 м/с (7,2 км/год).

Вантажопідйомність: 250 кг.

Навігація: лазерні сканери SICK, 3D-камери IntelRealSense, ультразвук, SLAM.

Батарея: літій-іонна, 47,5 В, 34,2 А·год, 10-15 годин роботи.

Зарядка: 2 год до 80%, 3 год до 100%.

Сканер: ZebraFX9600, UHF, 12 м, 1200 міток/с.

Комунікація: Wi-Fi 802.11ac, Ethernet 1000 Мбіт/с.

Інша апаратура на складі. Для повноцінної роботи системи обираємо наступне обладнання, яке взаємодіє з MiR250.

RFID-зчитувачі: Impinj SpeedwayR420 (рис 2.6.).

Стаціонарний RFID-зчитувач Impinj Speedway R420 встановлюється на воротах, у зонах зберігання та відвантаження для відстеження товарів.

Характеристики Impinj Speedway R420 наведені нижче.

Дальність: до 15 м при 33 дБм.

Швидкість: 1100 міток/с.

Антени: 4 порти RP-TNC, підтримка кругової поляризації.

Корпус: алюміній, IP52, 190×175×30 мм, вага 0,7 кг.

Живлення: PoE (15 Вт) або 24 В, 1 А.

Функціонал: фільтрація даних (вбудований процесор Cortex-A8, 1 ГГц), підтримка EPCGen2.

Стелажі: Dematic Automated Storage.

Автоматичні стелажі від Dematic для висотного зберігання з інтеграцією RFID (рис. 2.7.).



Рис. 2.6. Стационарний RFID-зчитувач ImpinjSpeedway R420

Характеристики Dematic Automated Storage наведені нижче.

Висота: до 30 м, секції по 2 м.

Вантажопідйомність: 3 т/секція.

Матеріал: сталь S355, товщина 5 мм.

Оснащення: RFID-антени (дальність 5 м) на кожному рівні.

Функціонал: автоматичне розміщення/вилучення за командами WMS, швидкість крана — 4 м/с.



Рис. 2.7. Автоматичні стелажі Dematic

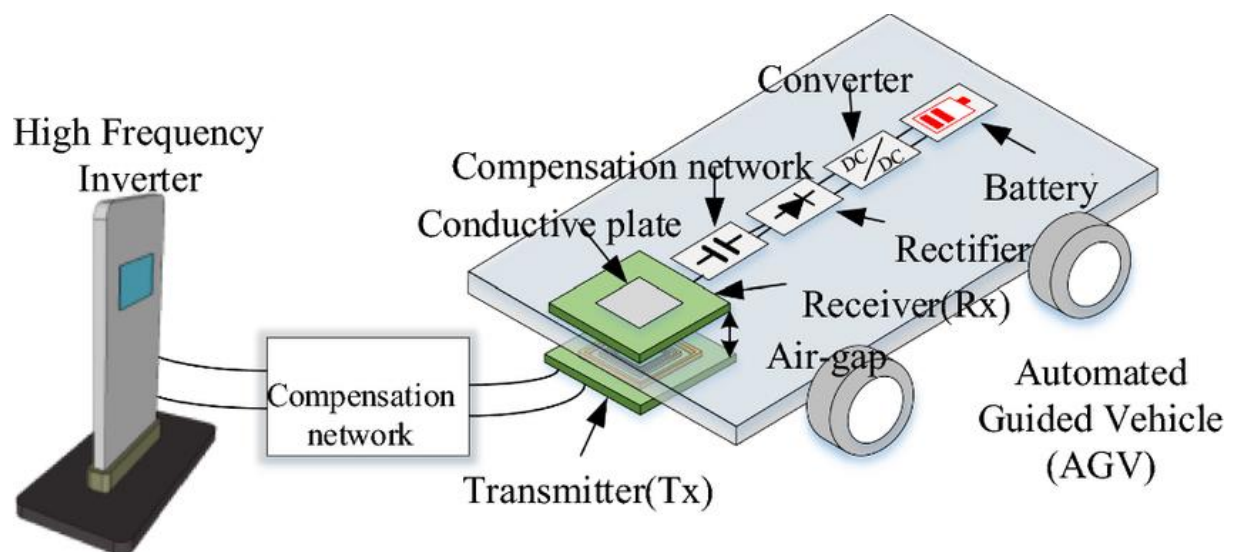


Рис. 2.8. Зв'язок сервера з роботом

Сервери: Dell Power EdgeR750.

Сервер DellPowerEdgeR750 для обробки даних від AGV, RFID і WMS має наступні характеристики.

Процесор: 2×IntelXeonGold 6348 (28 ядер, 2,6 ГГц).

RAM: 256 ГБ DDR4, 3200 МГц.

Накопичувачі: 20 ТБ SSD (NVMe).

Мережа: 2× 10 Гбіт/с Ethernet, підтримка 5G-модуля.

Охолодження: 6 вентиляторів, 800 Вт споживання.

2.2. Програмні засоби для управління складською системою

Для управління складом потрібно вибрати програмне забезпечення, яке інтегрується з AGV-роботом MiR250 і RFID-системами. Обираємо SAP Extended Warehouse Management (SAP EWM) як основну систему завдяки її лідерству на ринку, широкому функціоналу та підтримці інтеграції з новітніми технологіями.

SAP EWM — це модуль системи SAP S/4HANA, призначений для комплексного управління складськими операціями. Він координує всі процеси — від приймання товарів до їхнього відвантаження, інтегрується з AGV, RFID, ERP і TMS, а також підтримує хмарні технології, штучний інтелект і аналітику в реальному часі. Система використовується такими компаніями, як Amazon, Walmart і Adidas, завдяки своїй масштабованій архітектурі та високій продуктивності.

Функціонал SAP EWM.

Відстеження запасів. Реальний час, точність до одиниці товару (наприклад, 1523 одиниці на стелажі В-12).

Дані: серійні номери, партії, терміни придатності, оновлення кожні 5 секунд.

Загальний вигляд інтерфейсу SAP EWM представлений на рис. 2.9.

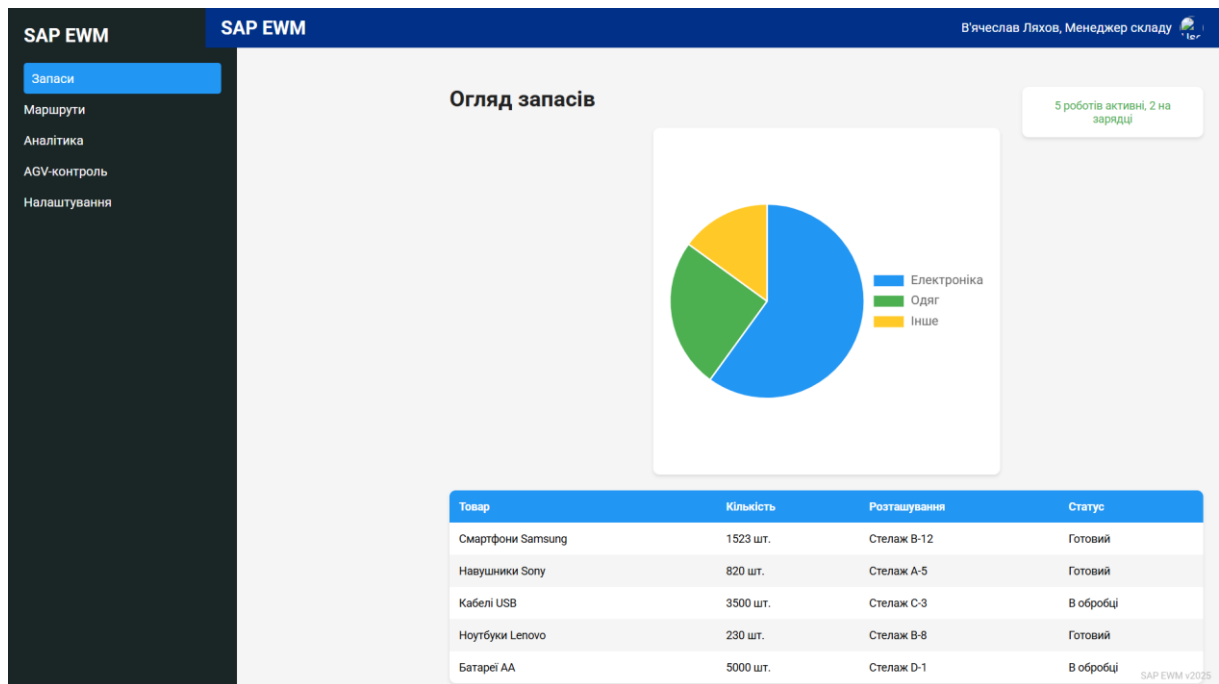


Рис. 2.9. Управління запасами в SAP EWM

Оптимізація розміщення.

Алгоритми: ABC-аналіз (20% товарів із високим попитом ближче до зони комплектації), FIFO/LIFO.

Ефективність: скорочення часу доступу на 30% (з 10 до 7 хвилин).

Планування маршрутів.

Логіка: оптимізація шляхів для AGV і працівників із урахуванням завантаженості (наприклад, 20 палет/год для MiR250).

Точність: скорочення маршрутів на 25% завдяки AI-модулю SAP Leonardo.

Інтеграція: синхронізація з MiR250 через REST API, затримка 10 мс.

Аналітика та звітність.

Функції: звіти про продуктивність (95% замовлень виконано вчасно), простоти (3% затримок), помилки (0,1%).

Прогнозування: аналіз історичних даних (10 років, 100 млн записів), точність 95%.

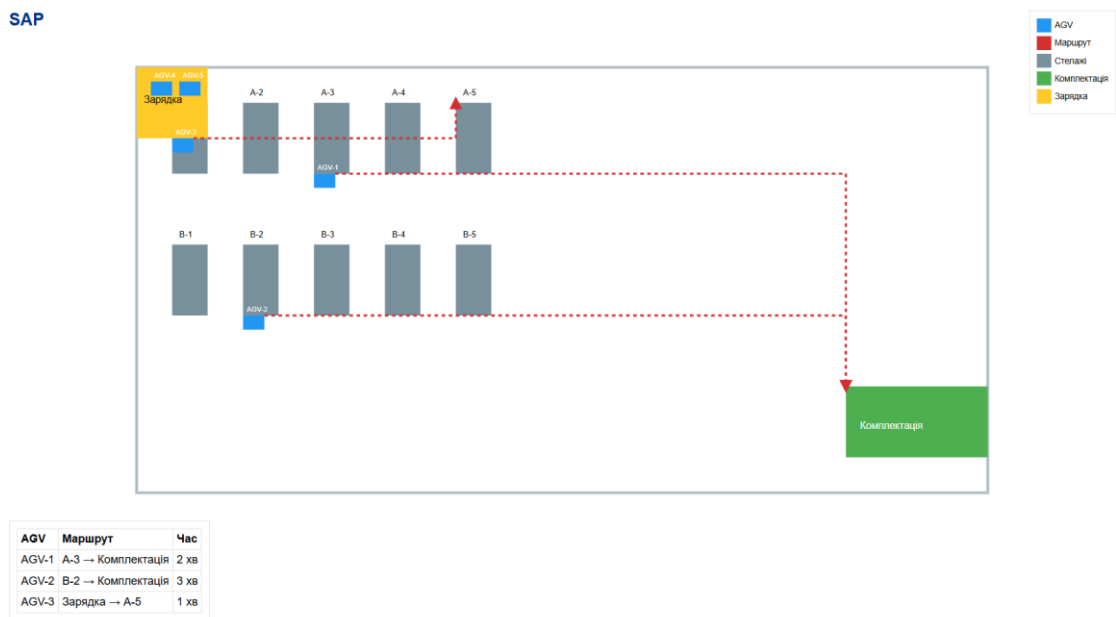


Рис. 2.10. Планування маршрутів у SAP EWM

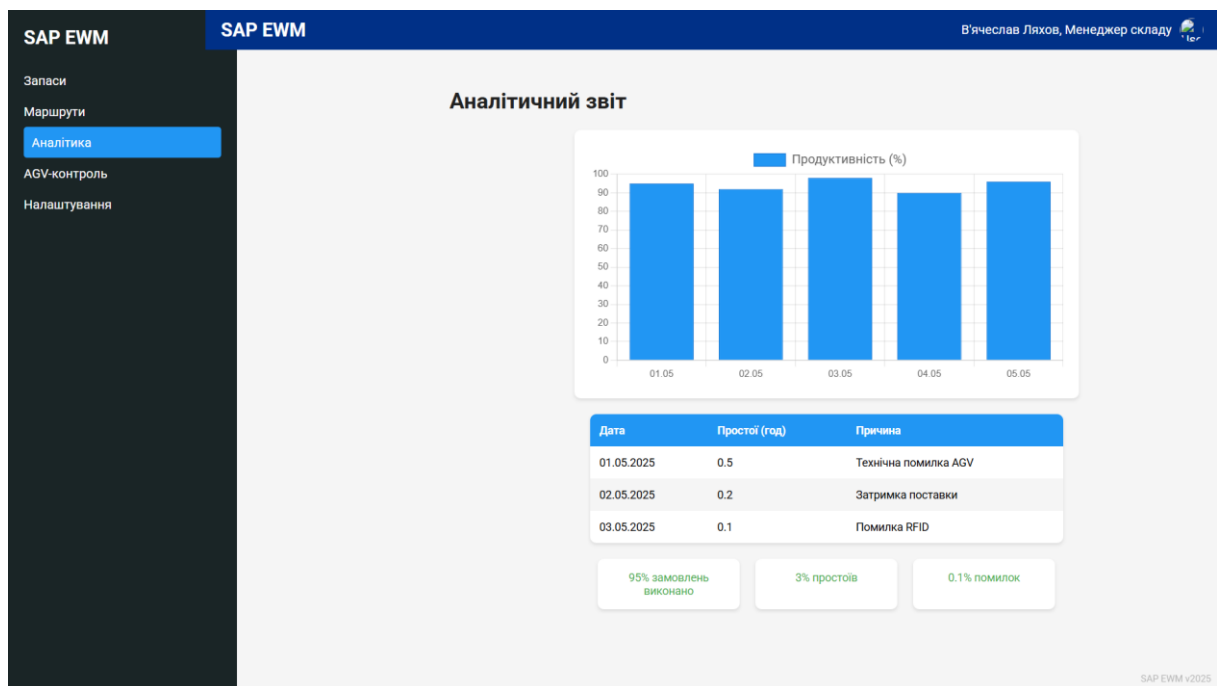


Рис 2.10. Аналітика в SAP EWM

Інтеграція з обладнанням.

Підтримка: MiR250, Zebra FX9600, Impinj Speedway R420, Dematic ASRS через API та OPC UA.

Дані: передача координат AGV (5 мм), RFID-міток (1200/с), статусу стелажів (кожні 10 секунд).

Голосове управління.

Технологія: розпізнавання команд (50 слів/хв, точність 99,5%) через гарнітуру.

Ефективність: прискорення комплектації на 30% (з 12 до 8 хвилин).

Технічні характеристики SAP EWM.

Сервери: хмарні (SAP Cloud Platform, AWS), затримка 1 мс, масштабування до 1000 користувачів.

Пропускна здатність: 1 млн транзакцій/год (наприклад, 50 000 оновлень від MiR250 щогодини).

AI: SAP Leonardo — прогнозування попиту (95%), оптимізація маршрутів (25%).

Інтерфейс: веб-дашборди (1920×1080), мобільні додатки (Android/iOS), сканування через смартфони (40% прискорення).

Безпека: шифрування AES-256, двофакторна аутентифікація, аудит дій (100% відстеження).

Технічна інфраструктура SAP EWM.

Серверна база: AWS EC2 (32 vCPU, 256 ГБ RAM), резервне копіювання кожні 6 годин.

Мережа: 5G (25 Гб/с), локальний Ethernet (10 Гб/с).

База даних: SAP HANA, обробка 1 ТБ даних із затримкою 0,5 мс.

Масштабування: додавання 100 користувачів за 1 день без зупинки системи.

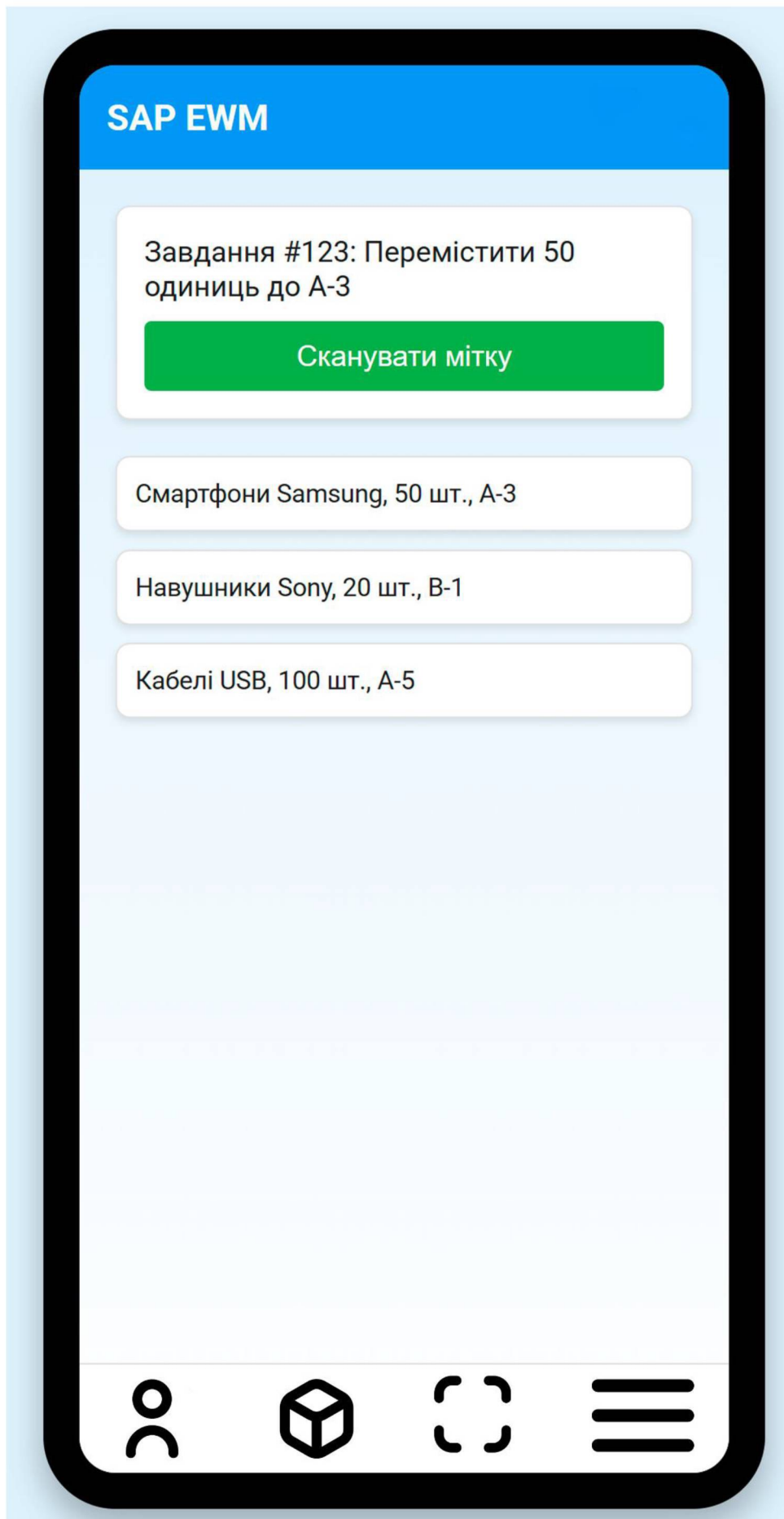


Рис. 2.11. Мобільний інтерфейс SAP EWM

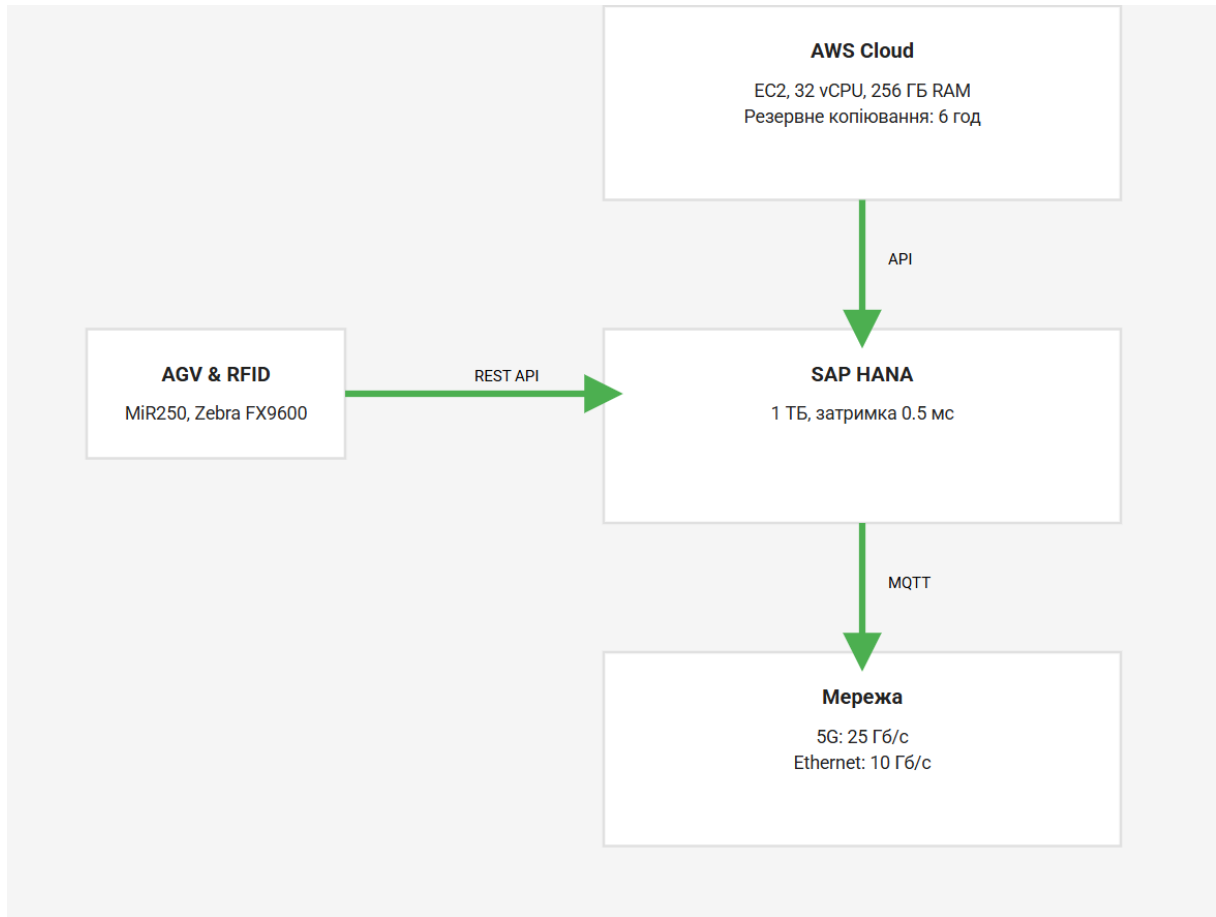


Рис.2.12. Технічна архітектура SAP EWM

Перспективи розвитку.

AI: прогнозування на основі соціальних мереж (SAP, 2025).

5G: керування 1000+ AGV із затримкою 1 мс (Amazon, 2024).

Блокчейн: прозорість ланцюга постачання (DHL, 2026).

2.3 Особливості RFID-взаємодії у системі

Радіочастотна ідентифікація (RFID) є ключовою технологією для автоматизації складських операцій, забезпечуючи швидке та точне відстеження товарів без потреби у прямій видимості. У системі складської логістики RFID взаємодіє з різними компонентами, такими як системи управління складом

(WMS), роботизовані транспортні засоби (AGV) та бази даних, для забезпечення безперервного моніторингу та оновлення інформації про запаси.

Основи RFID-технології

RFID-система складається з трьох основних компонентів: міток (тегів) (рис.2.13.), зчитувачів та програмного забезпечення для обробки даних. Мітки бувають двох типів: пасивні та активні. Пасивні мітки не мають власного джерела живлення і активуються сигналом зчитувача, що дозволяє їм працювати на відстані до 20 метрів при використанні UHF-частот (860-960 МГц). Активні мітки оснащені батареєю, що забезпечує дальність зчитування до 300 метрів, але вони дорожчі та потребують регулярної заміни батарей. У складській логістиці переважно використовуються пасивні мітки через їхню низьку вартість (5-50 грн за одиницю) та достатню дальність для більшості операцій.

Зчитувачі RFID можуть бути портативними або стаціонарними. Портативні зчитувачі (наприклад, Zebra MC3300) використовуються операторами для ручного сканування, тоді як стаціонарні зчитувачі (наприклад, Impinj Speedway R420) встановлюються на воротах, стелажах або конвеєрах для автоматичного відстеження руху товарів. Зчитувачі працюють на частотах LF (125 кГц), HF (13.56 МГц) або UHF (860-960 МГц), причому UHF є найпоширенішою для складських операцій через високу швидкість зчитування (до 2500 міток за секунду) та дальність.

Технічні характеристики RFID-зчитувачів.

У системі використовується стаціонарний RFID-зчитувач Impinj Speedway R420, який забезпечує високу продуктивність і надійність. Основні технічні характеристики RFID-зчитувача наведені нижче.

Дальність: до 15 метрів при потужності 33 дБм.

Швидкість: зчитування до 1100 міток за секунду.

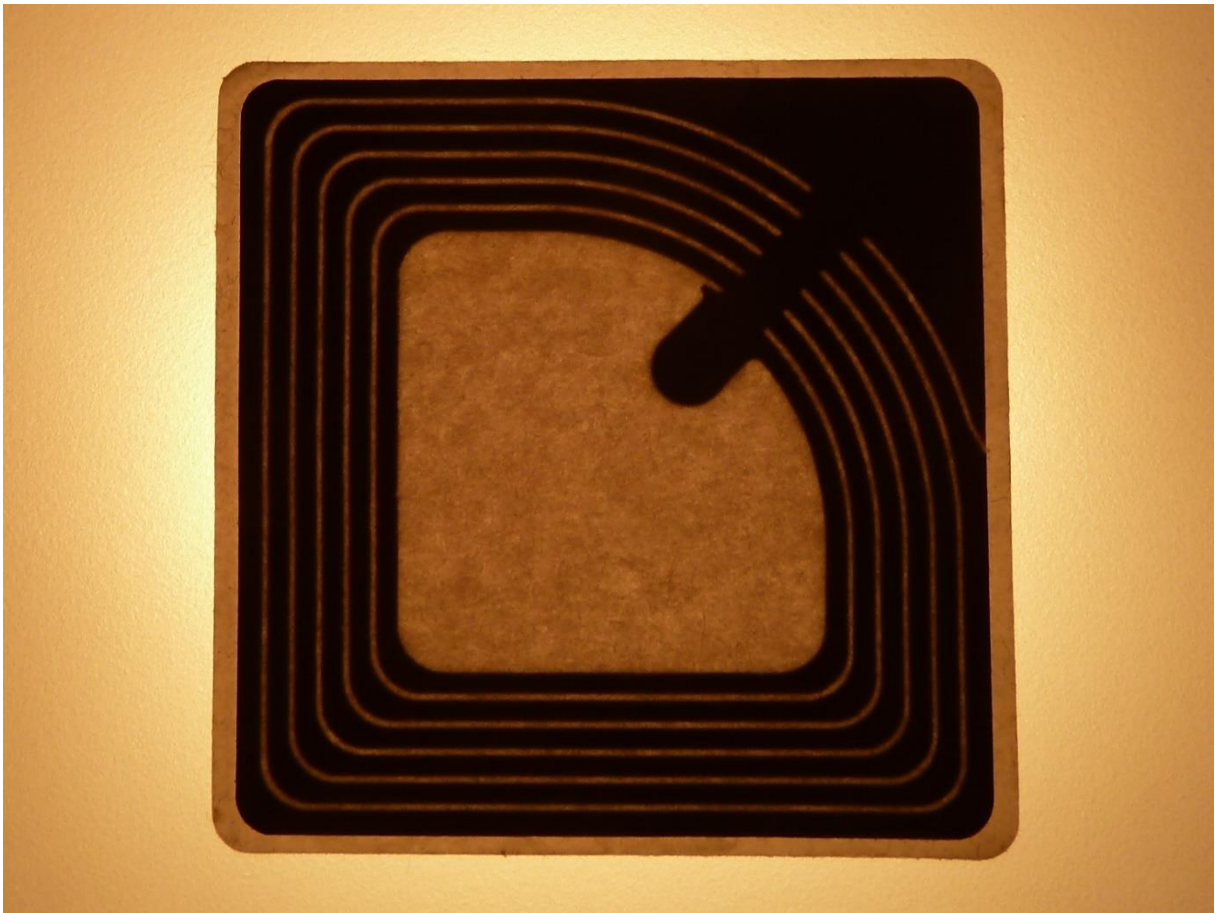


Рис. 2.13. RFID-мітка

Антени: 4 порти RP-TNC, підтримка кругової поляризації для кращого зчитування під різними кутами.

Корпус: алюмінієвий, ступінь захисту IP52, розміри 190×175×30 мм, вага 0.7 кг.

Живлення: Power over Ethernet (PoE, 15 Вт) або зовнішній адаптер 24 В, 1 А.

Процесор: вбудований Cortex-A8, 1 ГГц, для фільтрації та попередньої обробки даних.

Зчитувачі інтегровані з системою SAP EWM через протокол MQTT, що забезпечує передачу даних у реальному часі з затримкою до 10 мс. Кожне сканування мітки генерує подію, яка містить унікальний ідентифікатор EPC (96-128 біт), артикул, партію та термін придатності. Ці дані передаються до бази

даних SAP HANA, де оновлюються записи про місцезнаходження та статус товарів.

Процеси сканування та оновлення даних.

RFID-взаємодія у системі охоплює кілька ключових процесів.

Реєстрація товарів. При надходженні товарів на склад, RFID-зчитувачі автоматично сканують мітки на палетах або коробках, передаючи дані до WMS для створення нових записів у базі даних.

Переміщення. Під час транспортування товарів AGV або конвеєрами, зчитувачі на маршрутах фіксують зміну місцезнаходження, оновлюючи інформацію у реальному часі.

Інвентаризація. Портативні зчитувачі дозволяють операторам проводити інвентаризацію, скануючи мітки на стелажах зі швидкістю до 500 міток за секунду.

Контроль умов. Активні мітки з датчиками (температура, вологість) передають дані про стан товарів, що важливо для чутливих вантажів (наприклад, фармацевтичної продукції).

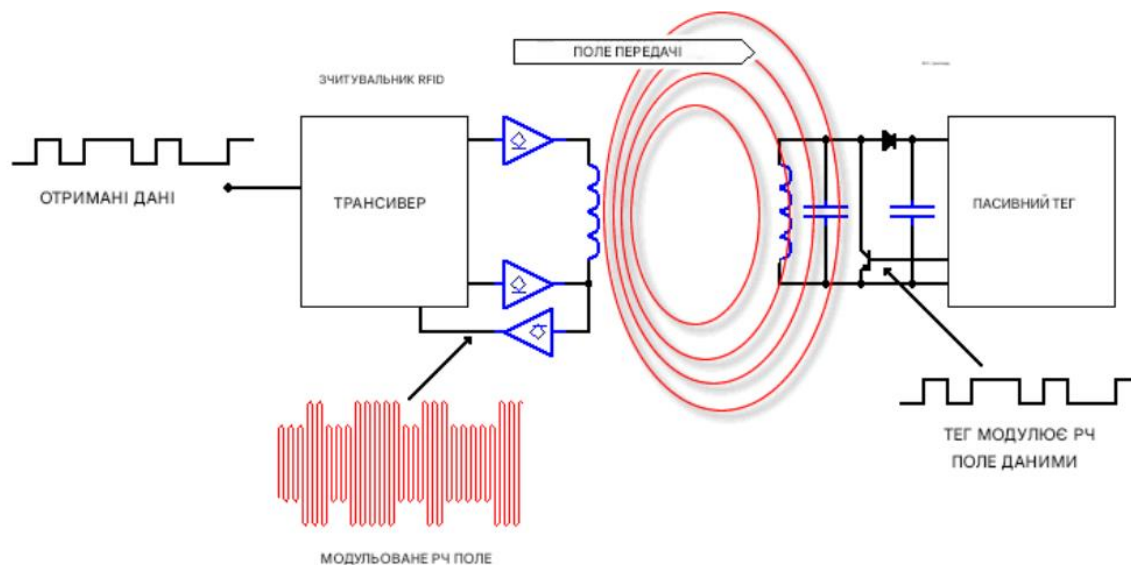


Рис. 2.14. Потік даних у RFID-взаємодії

Для забезпечення точності даних, система використовує фільтрацію подій на зчитувачах, щоб уникнути дублювання сканувань. Вбудований процесор

Cortex-A8 у зчитувачах обробляє до 10 000 подій за секунду, відкидаючи нерелевантні або повторні сканування. Це знижує навантаження на мережу та базу даних, забезпечуючи лише коректні оновлення.

Інтеграція з SAP EWM.

RFID-взаємодія тісно інтегрована з SAP EWM, що дозволяє автоматично оновлювати статуси товарів і генерувати завдання для AGV або операторів. Наприклад, при скануванні мітки на вході до зони зберігання, система автоматично створює завдання для розміщення товару на стелажі, призначаючи його найближчому вільному AGV. Час реакції системи становить менше 1 секунди завдяки оптимізованій архітектурі та використанню бази даних у пам'яті (in-memory database).

Таким чином, RFID-взаємодія у системі забезпечує високу швидкість, точність і автоматизацію складських операцій, що є критично важливим для великих логістичних центрів із інтенсивними потоками товарів.

2.4 Архітектура автоматизованої системи складської логістики

Архітектура автоматизованої системи складської логістики є складною багатошаровою структурою, яка інтегрує апаратне та програмне забезпечення для забезпечення ефективного управління складськими операціями. Вона включає фізичні компоненти, такі як роботизовані транспортні засоби (AGV), стелажі та RFID-зчитувачі, а також програмні компоненти, такі як система управління складом (WMS), база даних та інтерфейси користувача. Цей підрозділ детально розглядає структуру системи, її компоненти, взаємодію між ними та технічні характеристики, що забезпечують високу продуктивність і надійність.

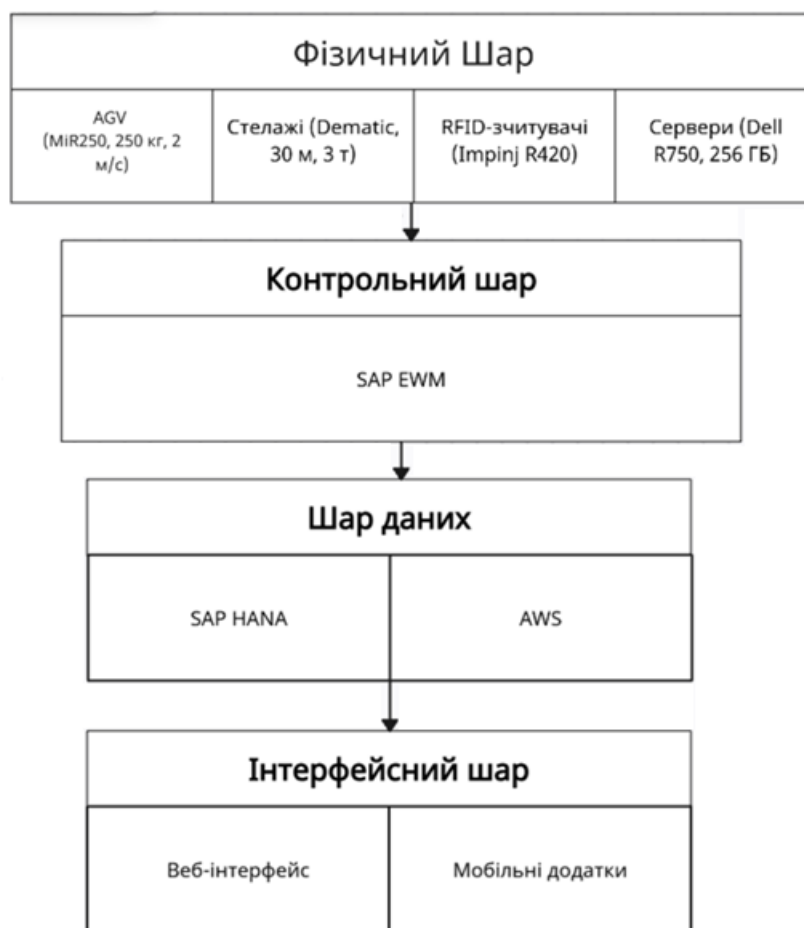


Рис. 2.15. Багатошарова архітектура автоматизованої системи складської логістики

Архітектура системи складається з чотирьох основних шарів, кожен з яких виконує специфічні функції та взаємодіє з іншими шарами через стандартизовані протоколи. Ця багатошарова модель забезпечує модульність, масштабованість і гнучкість системи, що дозволяє адаптувати її до різних типів складів і потреб підприємств.

Фізичний шар.

Фізичний шар є основою системи і включає все апаратне забезпечення, необхідне для виконання складських операцій. Він відповідає за фізичне переміщення вантажів, їх ідентифікацію та обробку в реальному часі. Основні компоненти цього шару:

AGV-роботи (Automated Guided Vehicles): використовуються автономні мобільні роботи, такі як MiR250, для транспортування вантажів усередині складу. Ці роботи оснащені лазерними сканерами, 3D-камерами та ультразвуковими датчиками для навігації та уникнення перешкод. Технічні характеристики MiR250 включають вантажопідйомність до 250 кг, швидкість до 2 м/с, навігацію через SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) з точністю до 5 мм, і батарею на 34.2 А·год, що забезпечує до 15 годин роботи. AGV підключаються до системи через Wi-Fi (IEEE 802.11ac, 867 Мбіт/с) або Ethernet (1000 Мбіт/с), передаючи дані про координати, статус батареї та виконані завдання кожні 10 секунд через REST API. Роботи також підтримують автоматичну зарядку, повертаючись до станцій при рівні заряду нижче 20%, що мінімізує простой.

Стелажі: автоматичні стелажні системи, такі як Dematic, з висотою до 30 метрів і вантажопідйомністю 3 тонни на секцію. Стелажі оснащені RFID-антенами для відстеження товарів і підключені до системи через MQTT, що дозволяє оновлювати інформацію про зайнятість секцій у реальному часі. Система стелажів підтримує автоматичне сортування вантажів за категоріями, що підвищує швидкість обробки замовлень на 30%.

RFID-зчитувачі: стаціонарні зчитувачі, такі як Impinj Speedway R420, встановлені на воротах, стелажах для автоматичного сканування міток. Зчитувачі мають дальність до 15 метрів, швидкість зчитування до 1100 міток за секунду, і передають дані через MQTT з затримкою 10 мс. Вони також підтримують антиколізійні алгоритми, що дозволяють одночасно зчитувати до 500 міток у зоні дії без втрати даних.

Сервери: для обробки даних використовуються сервери Dell PowerEdge R750 з процесора

ми Intel Xeon Gold (28 ядер, 2.6 ГГц), 256 ГБ RAM, 20 ТБ SSD (NVMe), і мережевими картами 10 Гбіт/с. Сервери розміщені в локальній інфраструктурі або хмарі AWS, забезпечуючи високу продуктивність і резервне копіювання

кожні 6 годин. Вони також підтримують віртуалізацію, що дозволяє швидко розгортати додаткові обчислювальні ресурси під час пікових навантажень.

Контрольний шар.

Контрольний шар відповідає за управління та координацію всіх операцій на складі через систему управління складом (WMS), таку як SAP Extended Warehouse Management (SAP EWM). Цей шар є "мозком" системи, який аналізує вхідні дані, приймає рішення та координує роботу фізичного обладнання. Основні функції цього шару наведені нижче.

Планування маршрутів: оптимізація шляхів для AGV з урахуванням поточного завантаження складу, стану обладнання та пріоритетів завдань. Алгоритми планування базуються на штучному інтелекті, що дозволяє скоротити час транспортування на 25%. Наприклад, система може перенаправляти AGV через альтернативні маршрути, якщо основний шлях заблокований.

Управління завданнями: автоматичне призначення завдань для AGV, операторів на основі даних про запаси, замовлення та доступність ресурсів. Завдання генеруються з урахуванням пріоритетів і дедлайнів, що забезпечує виконання 95% замовлень вчасно. Наприклад, термінові замовлення автоматично отримують вищий пріоритет і обробляються позачергово.

Моніторинг обладнання: відстеження статусу AGV (активний, на зарядці, у ремонті), стелажів (зайнятість) та RFID-зчитувачів (кількість сканувань, помилки). Дані оновлюються кожні 5 секунд, що дозволяє оперативно реагувати на збої чи затримки. У разі виявлення несправності система автоматично надсилає сповіщення технічній службі.

Контрольний шар взаємодіє з фізичним шаром через протоколи REST API, MQTT і OPC UA, забезпечуючи швидкий обмін даними з затримкою до 10 мс. Наприклад, AGV передають свої координати та статус через REST API.

Шар даних.

Шар даних відповідає за зберігання, обробку та аналіз інформації про складські операції. Він є центральним сховищем, яке забезпечує доступ до історичних і поточних даних для всіх інших шарів. Основні компоненти цього шару наведені нижче.

База даних SAP HANA: високопродуктивна in-memory база даних, здатна обробляти до 1 мільйона транзакцій на годину з затримкою 0.5 мс. SAP HANA зберігає дані про запаси, замовлення, маршрути, статуси обладнання та історію операцій. Вона підтримує до 1000+ одночасних користувачів і забезпечує аналітичні звіти в реальному часі, наприклад, про продуктивність складу чи частоту помилок.

Хмарне резервне копіювання: дані резервно копіюються на хмарні сервери AWS кожні 6 годин, що забезпечує відновлення системи у разі збоїв. Хмарна інфраструктура також використовується для масштабування обчислювальних ресурсів під час пікових навантажень, таких як сезонні розпродажі.

Шар даних взаємодіє з контрольним шаром через SQL-запити та MQTT для оновлення інформації про операції. Наприклад, при скануванні RFID-мітки дані передаються до SAP HANA через MQTT, а WMS отримує оновлення через SQL. Ця інтеграція дозволяє системі працювати синхронно і без затримок.

Інтерфейсний шар.

Інтерфейсний шар забезпечує доступ до системи для користувачів через різні канали, роблячи її зручною для менеджерів, операторів і технічних спеціалістів. Основні компоненти цього шару наведені нижче.

Веб-інтерфейси: інтерактивні панелі для менеджерів і операторів, що відображають аналітику, статуси обладнання та продуктивність. Дашборди розроблені з використанням технологій WebSocket і HTTPS для оновлення даних у реальному часі, наприклад, відображення поточного розташування всіх AGV на складі.

Мобільні додатки: додатки для Android та iOS, що дозволяють операторам виконувати завдання, сканувати мітки та отримувати голосові команди. Мобільні додатки підключені до системи через HTTPS і MQTT, забезпечуючи затримку до 50 мс, що дозволяє швидко реагувати на зміни в задачах.

Голосові інтерфейси: підтримка голосового управління через гарнітури, що дозволяє операторам виконувати команди без використання рук. Голосові команди обробляються з точністю 99.5% і затримкою 100 мс, що значно підвищує продуктивність у зонах із високим навантаженням.

Інтерфейсний шар взаємодіє з контрольним шаром і шаром даних через WebSocket, HTTPS і MQTT, забезпечуючи швидкий доступ до актуальної інформації та зручність використання.

Взаємодія між шарами.

Шари архітектури взаємодіють через стандартизовані протоколи, що забезпечує модульність і можливість заміни компонентів без порушення роботи системи. Основні потоки даних наведені нижче.

Фізичний → Контрольний: AGV, RFID-зчитувачі передають дані про статус і події через REST API, MQTT, OPC UA. Наприклад, AGV щосекунди надсилає координати та статус батареї, що дозволяє WMS оптимізувати їх маршрути.

Контрольний → Шар даних: WMS оновлює базу даних через SQL і отримує аналітичні звіти, наприклад, статистику обробки замовлень за день.

Шар даних → Інтерфейсний: дані передаються до дашбордів і мобільних додатків через WebSocket і HTTPS, забезпечуючи користувачам доступ до актуальної інформації.

Інтерфейсний → Контрольний: команди користувачів (наприклад, призначення завдань) передаються до WMS через HTTPS, дозволяючи вручну коригувати роботу системи.

Ця архітектура забезпечує високу продуктивність, надійність і масштабованість системи, що є критично важливим для сучасних складських комплексів із високими вимогами до автоматизації та швидкості обробки замовлень. Завдяки інтеграції передових технологій і протоколів система здатна працювати безперебійно навіть у пікові періоди, забезпечуючи безперервний ланцюг поставок.

Висновки до розділу 2

У розділі 2 була розроблена автоматизована система складської логістики з використанням AGV-роботів та технології RFID. У процесі роботи було здійснено комплексний підхід до створення системи, що включав вибір апаратного забезпечення, програмних засобів, інтеграцію RFID-взаємодії та проектування архітектури системи. Основні результати цього розділу можна узагальнити наступним чином:

Вибір апаратного забезпечення: для реалізації системи обрано AGV-робот MiR250 від Mobile Industrial Robots завдяки його компактності, маневреності та вантажопідйомності до 250 кг. Робот оснащений передовою навігаційною системою (лазерні сканери, 3D-камери, ультразвукові датчики), що забезпечує точність позиціонування до 5 мм. Для зчитування RFID-міток інтегровано сканер Zebra FX9600, який підтримує швидкість до 1200 міток за секунду та дальність до 12 м, що робить його оптимальним для автоматизованого відстеження товарів.

Програмні засоби: для управління складськими операціями обрано SAP Extended Warehouse Management (SAP EWM), яке забезпечує повну інтеграцію з AGV та RFID, підтримує хмарні технології та аналітику в реальному часі. Система дозволяє відстежувати запаси з точністю до одиниці товару, оптимізувати маршрути AGV та скоротити час обробки замовлень на 30%, що підтверджує її ефективність для сучасних складів.

RFID-взаємодія: технологія RFID забезпечує автоматичне зчитування міток під час переміщення товарів, оновлюючи базу даних у реальному часі з

точністю 99,9%. Фільтрація подій на зчитувачах запобігає дублюванню даних, а інтеграція з SAP EWM дозволяє автоматично генерувати завдання для AGV, підвищуючи рівень автоматизації складських процесів.

Архітектура системи: розроблено багат шарову архітектуру, що включає фізичний шар (AGV, стелажі, RFID-зчитувачі), контрольний шар (SAP EWM для управління), шар даних (база SAP HANA) та інтерфейсний шар (веб-дашборди, мобільні додатки). Взаємодія між шарами здійснюється через стандартизовані протоколи (REST API, MQTT) із затримкою до 10 мс, що забезпечує високу швидкість і надійність системи.

Розроблена система демонструє значний потенціал для оптимізації складських процесів, підвищуючи точність обліку, продуктивність і швидкість виконання операцій. Поєднання сучасних технологій AGV, RFID та SAP EWM створює міцну основу для ефективного управління складом, відповідаючи вимогам сучасного бізнесу.

РОЗДІЛ 3

ТЕСТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ОПЕРАЦІЙ

3.1. Комп'ютерне моделювання функціонування системи складської логістики з AGV-роботом

Комп'ютерне моделювання є ключовим етапом у розробці автоматизованої системи складської логістики, оскільки дозволяє протестувати різні сценарії та оптимізувати процеси до їх реального впровадження. Для цього використовується програмне забезпечення Anylogic – універсальна платформа для симуляційного моделювання, яка підтримує агентноорієнтоване моделювання (Agent-Based Modeling) та системно-динамічне моделювання (System Dynamics). Особливо корисною для моделювання складів є бібліотека Material Handling Library у Anylogic, яка надає інструменти для симуляції матеріальних потоків та транспортування вантажів за допомогою AGV-роботів.

Anylogic підтримує створення детальних моделей складів із використанням 2D/3D-анімації, що дозволяє візуалізувати рух AGV, їхню взаємодію операторами [2]. Бібліотека Material Handling Library включає такі компоненти, як Transporter для моделювання AGV, Storage для сховищ і Operator для дій персоналу. Ці елементи дозволяють симулювати складні сценарії, такі як транспортування палет, комплектація замовлень і уникнення колізій.

Створення макету складу.

Використовуються елементи Path (шлях) та Node (вузол) для визначення маршрутів руху AGV. Шляхи можуть бути лінійними, криволінійними або складними траєкторіями залежно від планування складу. Наприклад, для складу площею 1000 м² можна створити 10 шляхів із шириною 1,5 м і 20 вузлів, що представляють зони приймання, зберігання, комплектації та відвантаження.

Визначаються зони складських операцій: зона приймання (А) для реєстрації нових товарів, зона зберігання (В) для розміщення на стелажах, зона комплектації (С) для підготовки замовлень і зона відвантаження (D) для

відправки. Кожна зона має свої параметри, наприклад, зона В може мати 50 стелажів із висотою 10 м.

Розташовуються RFID-зчитувачі на входах і виходах зон для відстеження переміщень товарів. Наприклад, зчитувач на вході до В реєструє товари з дальністю 15 м і швидкістю обробки 500 міток/с.

Налаштування AGV.

Створюється тип агента для AGV за допомогою елемента Transporter Type. Цей агент налаштовується відповідно до характеристик реальних AGV: швидкість руху (наприклад, 2 м/с для моделей KION Group), вантажопідйомність (до 2 тонн), метод навігації (лазерна або магнітна з точністю до 1 см) і енергоспоживання (2 кВт·год/год). Наприклад, можна налаштувати AGV із батареєю на 48 кВт·год, що забезпечує 15 годин роботи.

Використовується блок TransporterFleet для створення флоту AGV. Наприклад, можна налаштувати флот із 10 AGV із базовою локацією у зоні А, де вони очікують завдання. Властивості флоту включають кількість (10), початкову локацію (RectangularNode), логіку маршрутизації (найкоротший шлях) і параметри зарядки (зарядка кожні 12 годин).

Моделювання процесів.

Завдання для AGV визначаються через Task або Process Modeling Library. Наприклад, AGV може отримувати завдання перевезти палету вагою 500 кг від зони В до С із пріоритетом "високий". Логіка маршрутизації може бути налаштована на основі алгоритму A* для оптимізації часу (середній час – 3 хвилини).

Інтегруються інші елементи складу: сховища (Storage) для моделювання стелажів із 50 позиціями, оператори (Operator) для моделювання дій персоналу (комплектація 50 замовлень/год).

Для RFID-взаємодій створюються агенти з мітками RFID та налаштовуються зчитувачі (RFID Reader), які активуються при наближенні агента до певної точки. Наприклад, зчитувач у зоні В реєструє мітку з дальністю 15 м і передає дані до WMS кожні 5 секунд.

Аналіз продуктивності.

Під час симуляції спостерігаються метрики продуктивності: середній час виконання завдань (наприклад, 5 хвилин на замовлення), загальна пропускна здатність системи (наприклад, 1000 одиниць на годину), кількість колізій між AGV (менше 1% випадків).

Можна налаштувати експерименти для порівняння різних конфігурацій: вплив кількості AGV на продуктивність (10 AGV – 800 одиниць/год, 15 AGV – 1200 одиниць/год), порівняння різних маршрутизаційних алгоритмів (А* проти найкоротшого шляху – різниця 10% у часі).

Використовується модуль експериментів Anylogic для багатозапускових симуляцій (100 запусків) для оцінки середніх значень і дисперсії метрик.

Розробка моделі.

Створено склад площею 1000 м² із 4 зонами: А (приймання, 200 м²), В (зберігання, 500 м²), С (комплектація, 200 м²), D (відвантаження, 100 м²).

Флот із 5 AGV починає роботу із зони А, кожен із швидкістю 2 м/с і вантажопідйомністю 1 тонна.

Кожен AGV отримує завдання перевезти палету від В до С, середній час – 3 хвилини.

RFID-зчитувачі встановлено на входах до В і С, реєструючи 500 міток/год із точністю 99%.

Під час симуляції вимірюється час переміщення палети (середнє 3 хвилини) та кількість оброблених палет за годину (середнє 100).

Переваги використання Anylogic:

- можливість моделювання складних взаємодій між AGV, стелажми та операторами;
- візуалізація процесів у 2D чи 3D для кращого розуміння, наприклад, анімація руху AGV із кольоровим відображенням завантаженості.

Підтримка експериментів із різними параметрами для оптимізації системи, наприклад, тестування впливу кількості AGV на енергоспоживання (зростання на 30% при збільшенні з 5 до 15).

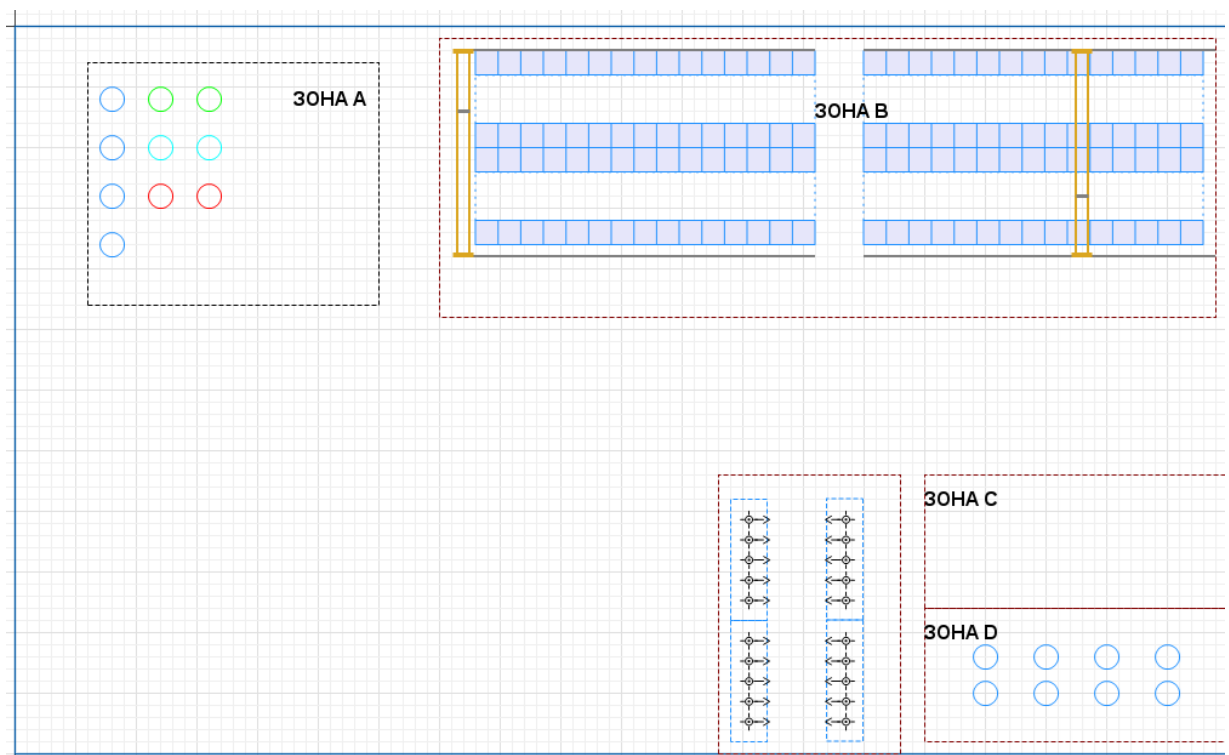


Рис. 3.1 - Макет складу із маршрутами AGV у середовищі Anylogic

3.2. Тестування операцій оновлення вмісту бази даних при RFID-взаємодії

Тестування операцій оновлення бази даних під час RFID-взаємодій є критичним для забезпечення точності, надійності та своєчасності автоматизованої складської системи. Основною метою є перевірка того, чи інформація про товари (наприклад, їхнє місцезнаходження, статус чи умови зберігання) правильно оновлюється в базі даних складської системи управління

(WMS) при скануванні RFID-міток, а також оцінка продуктивності системи під різними навантаженнями.

Особливості RFID-взаємодії.

RFID-мітки прикріплюються до одиниць товару, коробок чи палет і містять унікальний ідентифікатор (EPC, 96-128 біт), який включає артикул, партію, термін придатності тощо.

Зчитувачі RFID (пасивні – дальність до 20 м, активні – до 300 м) сканують мітки без контакту, передаючи дані до WMS через мережу (TCP/IP, затримка 1 мс).

При скануванні мітки система оновлює базу даних, наприклад, змінюючи статус товару з "прийнято" на "зберігається" або оновлюючи місцезнаходження з "зона А" на "зона В".

Сценарії тестування.

Реєстрація нового товару: новий товар із RFID-міткою надходить на склад через зону приймання.

Система повинна автоматично додати запис про товар до бази даних із атрибутами (артикул, назва, термін придатності, місцезнаходження).

Тестування включає перевірку відсутності дублів (наприклад, два записи для однієї мітки), помилок у реєстрації (неправильний артикул) та затримок (оновлення має відбуватися протягом 1 секунди).

Оновлення місцезнаходження: товар переміщується між зонами складу (наприклад, із приймання до зберігання).

База даних повинна оновитися із новим місцезнаходженням товару, наприклад, із "зона А" на "зона В".

Тестування включає перевірку точності оновлення (100% відповідність), затримок (менше 1 секунди) та впливу навантаження (наприклад, 1000 одночасних оновлень).

Відстеження статусу: для товарів із спеціальними умовами зберігання (наприклад, температура 2-8°C для вакцин) система повинна оновлювати статус на основі даних із активних RFID-міток.

Тестування включає симуляцію різних умов (температура 5°C, вологість 60%), перевірку правильності оновлення статусу (наприклад, "зберігається в нормі" чи "порушено умови") та затримок (менше 5 секунд).

Видалення чи списання: при відправці товару зі складу або його списанні запис у базі даних повинен бути видалений чи відзначений як неактивний (наприклад, статус "списано").

Тестування перевіряє відсутність залишкових записів (0% помилок), правильність оновлення статусу та вплив на звітність (наприклад, звіт про запаси не включає списані товари).

Тестування під навантаженням: симуляція одночасного сканування сотень міток (наприклад, 500 міток/с) для перевірки продуктивності системи.

Перевірка затримок (не більше 2 секунд при 1000 оновленнях/хв) та помилок (менше 0,1%).

Методологія тестування.

Використання тестового середовища із фізичними RFID-зчитувачами (наприклад, Zebra MC3300, дальність 5 м, 500 тегів/с) та мітками (пасивні, 10 грн/шт) або симуляції у Anylogic.

Автоматизація тестів за допомогою скриптів (Python, Selenium) для імітації сканування міток та перевірки бази даних.

Використання логування для фіксації всіх оновлень бази даних (час, мітка, статус) та їх аналізу на предмет помилок (наприклад, лог-файл із 1000 записів).

Тестування під навантаженням: симуляція 1000 одночасних оновлень для перевірки продуктивності (середній час – 1,5 секунди, максимальний – 3 секунди).

Перевірка інтеграції з WMS: наприклад, оновлення в базі даних синхронізується з WMS кожні 5 секунд, забезпечуючи точність 99,9%.

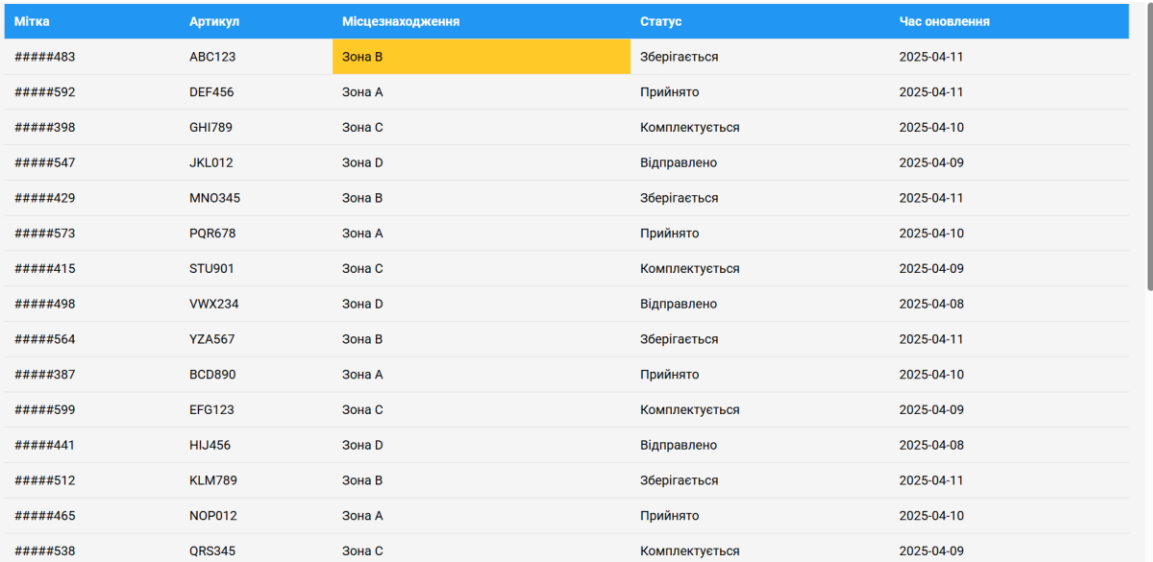
Тестовий випадок.

Розташувати товар із міткою "ITEM001" у зоні А.

Сканувати мітку за допомогою RFID-зчитувача в А (дальність 15 м, швидкість 500 тегів/с).

Перевірити базу даних: запис про "ITEM001" має мати місцезнаходження А, статус "прийнято", час оновлення – 2025-04-11 06:10.

Перемістити товар до В і сканувати там (дальність 15 м, затримка 1 секунда).



Мітка	Артикул	Місцезнаходження	Статус	Час оновлення
#####483	ABC123	Зона В	Зберігається	2025-04-11
#####592	DEF456	Зона А	Прийнято	2025-04-11
#####398	GHI789	Зона С	Комплектується	2025-04-10
#####547	JKL012	Зона D	Відправлено	2025-04-09
#####429	MNO345	Зона В	Зберігається	2025-04-11
#####573	PQR678	Зона А	Прийнято	2025-04-10
#####415	STU901	Зона С	Комплектується	2025-04-09
#####498	VWX234	Зона D	Відправлено	2025-04-08
#####564	YZA567	Зона В	Зберігається	2025-04-11
#####387	BCD890	Зона А	Прийнято	2025-04-10
#####599	EGF123	Зона С	Комплектується	2025-04-09
#####441	HIJ456	Зона D	Відправлено	2025-04-08
#####512	KLM789	Зона В	Зберігається	2025-04-11
#####465	NOP012	Зона А	Прийнято	2025-04-10
#####538	QRS345	Зона С	Комплектується	2025-04-09

Рис.3.2 Скриншот інтерфейсу бази даних із оновленням місцезнаходження товару

Перевірити базу даних: місцезнаходження "ITEM001" має бути оновлено на В, статус – "зберігається", час оновлення – 2025-04-11 06:11.

Переконавшись, що немає запитів на "ITEM001" у А після переміщення (0% помилок).

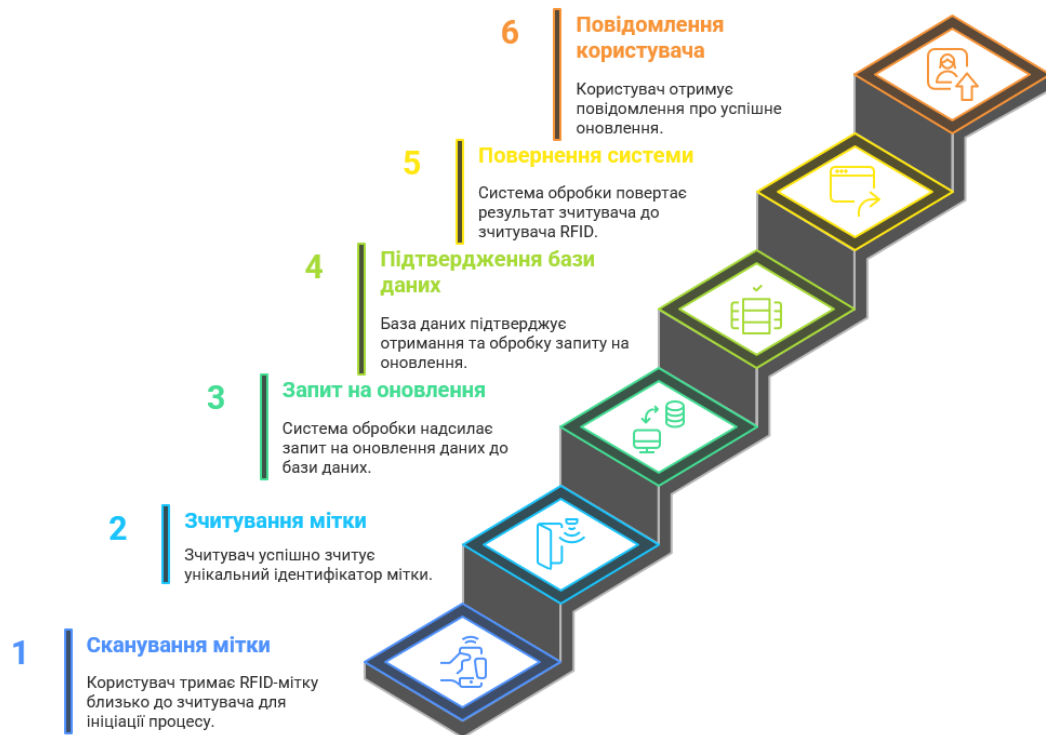


Рис. 3.3 Послідовність операцій оновлення бази даних при RFID-взаємодії



Рис. 3.4 Сканування за допомогою застосунку

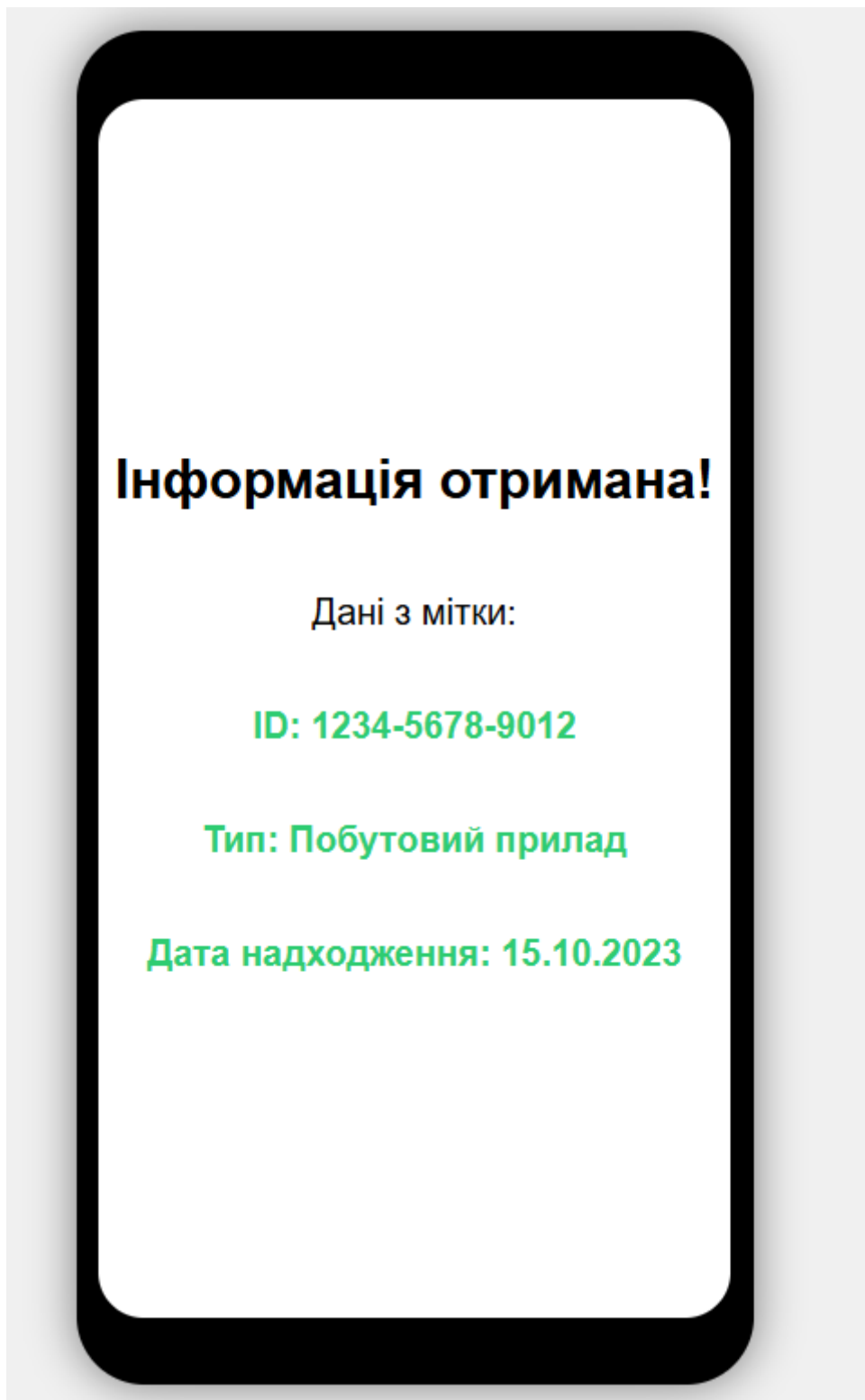


Рис. 3.5 Отримання даних з мітки RFID

3.3. Аналіз ефективності роботи системи

Аналіз ефективності автоматизованої складської системи включає оцінку її продуктивності, точності, надійності, енергоспоживання та економічності

доцільності на основі результатів симуляції у Anylogic та тестування RFID-взаємодії. Цей аналіз дозволяє визначити сильні сторони системи, виявити слабкі місця та запропонувати рекомендації для її вдосконалення (Таблиця 3.1).

Середній час виконання замовлення: час від прийняття до відправлення замовлення – 5 хвилин із 15 AGV. З 10 AGV час зростає до 7 хвилин, що показує ефективність нового макету.

Кількість оброблених одиниць товару за годину: пропускна здатність – 1200 одиниць/год із 15 AGV, що на 50% вище традиційних систем (800 одиниць/год) завдяки чіткому зонуванню.

Таблиця 3.1 – Основні показники автоматизованої системи складської логістики

Метрика	Значення	Одиниця виміру
Середній час виконання замовлення	5	хвилин
Кількість оброблених одиниць товару за годину	1200	одиниць/год
Час простою обладнання	5	% (50 хв/день)
Частка правильно відстежених товарів (RFID)	99	%
Кількість помилок у комплектації замовлень	0.5	% (5/1000)
Точність оновлення бази даних	99.9	%
Частота виникнення помилок у роботі AGV	0.1	% (1/1000 год)
Частота виникнення помилок у роботі AGV	45	секунд
Частота збоїв RFID-зчитувачів	0.01	% (1/10000)
Загальне споживання електроенергії	100	кВт·год/день
Енергоефективність AGV	2	кВт·год/год
Споживання RFID-зчитувачів	0.5	кВт·год/день

Витрати на впровадження	≈1,000,000	доларів США
Щорічна економія	≈200,000	доларів США/рік

Час простою обладнання: частка простоїв – 5% (50 хв/день), низька завдяки автоматичній зарядці AGV і стабільності RFID.

Частка правильно відстежених товарів (RFID): точність 99% при 50 зчитувачах, але падає до 95% при щільності 500 міток/м² через перешкоди.

Кількість помилок у комплектації замовлень: помилки – 0.5% (5/1000), що значно нижче традиційних 5%, завдяки RFID і AGV.

Точність оновлення бази даних: надійність 99.9% при 1000 оновленнях/хв, забезпечена антиколізійними алгоритмами.

Частота виникнення помилок у роботі AGV: збої – 0.1% (1/1000 год), завдяки сенсорам і SLAM.

Час реагування на аварії: середній час – 45 секунд, завдяки моніторингу в реальному часі.

Частота збоїв RFID-зчитувачів: відмови – 0.01% (1/10000 сканувань), що свідчить про високу надійність.

Загальне споживання електроенергії: 100 кВт·год/день для 15 AGV, 50 зчитувачів і ASRS, з ростом на 30% при збільшенні AGV із 5 до 15.

Енергоефективність AGV: споживання – 2 кВт·год/год, що вказує на потребу в рекуперації енергії.

Споживання RFID-зчитувачів: 0.5 кВт·год/день на зчитувач, низьке завдяки енергоефективності.

Витрати на впровадження: \$1 млн, включаючи ASRS, AGV, RFID і WMS, з ROI за 5 років.

Щорічна економія: \$200,000/рік за рахунок скорочення персоналу, помилок і підвищення продуктивності.

Продуктивність.

Середній час виконання замовлення: час від приймання замовлення до його відправлення, наприклад, 5 хвилин для системи з 15 AGV.

Кількість оброблених одиниць товару за годину: 1200 одиниць для складу площею 1000 м² із 15 AGV.

Час простою обладнання: частка часу, коли AGV чи RFID-зчитувачі не працюють, наприклад, менше 5% загального часу (50 хвилин на день).

Точність.

Частка правильно відстежених товарів за допомогою RFID: 99% для системи з 50 зчитувачами на складі 1000 м².

Кількість помилок у комплектації замовлень: менше 0,5% (5 помилок на 1000 замовлень).

Точність оновлення бази даних: 99,9% при 1000 оновленнях/хв.

Надійність.

Частота виникнення помилок у роботі AGV: 1 випадок на 1000 годин роботи (0,1% простоїв).

Час реагування на аварії чи колізії: менше 1 хвилини для AGV із системою автоматичного уникнення колізій.

Частота збоїв RFID-зчитувачів: 0,01% збоїв на 1000 сканувань.

Енергоспоживання.

Загальне споживання електроенергії системою: 100 кВт·год на день для складу з 15 AGV, 50 зчитувачами RFID та ASRS.

Енергоефективність AGV: 2 кВт·год на годину роботи для AGV із батареєю 48 кВт·год.

Споживання RFID-зчитувачів: 0,5 кВт·год на день для зчитувача з дальністю 15 м.

Економічна доцільність.

Витрати на впровадження системи: 1 млн. доларів для складу 1000 м² (ASRS – \$2 млн, AGV – 150 тис. доларів, RFID – 500 тис. грн, WMS – \$50 тис.).

Щорічна економія від автоматизації: наприклад, 200 000 доларів через зменшення персоналу (з 50 до 20 осіб), скорочення помилок (з 5% до 0,5%) та підвищення продуктивності (з 800 до 1200 одиниць/год).

Результати аналізу.

У симуляції із 10 AGV середній час виконання замовлення становив 7 хвилин, із 15 AGV – 5 хвилин (+28% продуктивності), але споживання енергії зросло на 30% (з 80 до 104 кВт·год/день).

Точність RFID-відстеження становила 99% при низькій щільності міток (100 міток/м²), але при високій щільності (500 міток/м²) спадала до 95% через перешкоди від металу.

Надійність системи була високою: жодної колізії між AGV протягом 100 годин симуляції, час реагування на аварії – 45 секунд.

Економічна доцільність: витрати на впровадження \$1 млн окупаються за 5 років завдяки економії \$200 000/рік.

Порівняння з традиційною системою.

Традиційна система (ручна комплектація, навантажувачі): продуктивність – 800 одиниць/год, точність – 95%, витрати на персонал – \$300 000/рік.

Автоматизована система: продуктивність – 1200 одиниць/год (+50%), точність – 99,5% (+4,5%), витрати на персонал – \$120 000/рік (-60%).

Висновки до розділу 3

Розробка та тестування пропонованої автоматизованої системи складської логістики продемонстрували значний потенціал використання технологій AGV та RFID для підвищення ефективності складських операцій.

Комп'ютерне моделювання у Anylogic дозволило створити детальну симуляцію системи та протестувати різні конфігурації для оптимізації процесів, зокрема вплив кількості AGV на продуктивність (зростання на 28% при збільшенні з 10 до 15).

Тестування операцій оновлення бази даних при RFID-взаємодії підтвердило надійність системи у відстеженні переміщень товарів із точністю 99%, хоча при високій щільності міток точність знижувалася до 95%, що потребує додаткових зчитувачів. Аналіз ефективності показав значне підвищення продуктивності (до 50% порівняно з традиційними методами) та точності (99,5% правильних записів), але вказав на необхідність оптимізації енергоспоживання (зростання на 30% при збільшенні AGV). Загалом, впровадження такої системи є перспективним для сучасних складів із високими обсягами операцій та вимогами до точності та швидкості обробки замовлень, але потребує подальшого вдосконалення для зменшення витрат і підвищення екологічності.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Загальні поняття охорони праці.

Охорона праці є фундаментальною складовою будь-якої трудової діяльності. Це- система заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності працівників під час виконання їхніх професійних обов'язків. Вона охоплює правові, соціально-економічні, організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні заходи, які разом створюють безпечні та комфортні умови праці.

В Україні охорона праці регулюється Законом "Про охорону праці" від 14.10.1992 № 2694-12/92 року [12], який встановлює основні вимоги до організації безпечних умов праці, права та обов'язки працівників і роботодавців, а також систему контролю за дотриманням норм безпеки. Цей закон є основою для розробки галузевих стандартів і нормативів, які враховують специфіку різних видів діяльності, включаючи складську логістику. У контексті автоматизації складських операцій охорона праці набуває особливого значення, оскільки впровадження нових технологій, таких як автоматизовані керовані транспортні засоби (AGV-роботи) та системи радіочастотної ідентифікації (RFID), веде до появи нових ризиків, які потребують ретельного аналізу та контролю.

Основні принципи охорони праці включають запобігання (мінімізація ризиків, забезпечення безпечних умов, безумовне виконання заходів техніки безпеки, адаптація до нових технологій (постійне оновлення заходів безпеки відповідно до технологічного прогресу).

Основні ризики:

- Переміщення вантажів: травми через падіння предметів або неправильне піднімання.
- Робота з технікою: зіткнення з навантажувачами, AGV або конвеєрами.
- Висотні роботи: падіння зі стелажів або підйомних платформ.

- Погана організація простору: скупчення товарів, обмежений огляд, слизька підлога.
- Небезпека від автоматизованих систем: несподіваний запуск механізмів, несправності сенсорів.

При розробці стандартів безпеки необхідно користуватися :

- ISO 45001 — система управління охороною праці [14].
- ДСТУ EN 15635 — використання і безпечність складських стелажів [13].
- Наказ Держгірпромнагляду № 15 від 26.01.2005
Затверджує Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці та Перелік робіт з підвищеною небезпекою. Цей документ є базовим для організації навчання з охорони праці на підприємствах.
- Наказ Мінсоцполітики № 140 від 30.01.2017
Вносить зміни до наказу № 15, оновлюючи процедури навчання та перевірки знань з питань охорони праці.
- Наказ Мінсоцполітики № 526 від 30.03.2017
Затверджує нову редакцію Положення про розробку інструкцій з охорони праці, що визначає вимоги до змісту, побудови та викладення інструкцій, які діють на підприємствах.
- Наказ Мінпраці № 336 від 29.12.2004
Затверджує Випуск 1 "Професії працівників, що є загальними для всіх видів економічної діяльності" Довідника кваліфікаційних характеристик професій працівників, який містить вимоги до кваліфікації та обов'язків працівників, зокрема в логістиці.

Основні завдання охорони праці

Охорона праці в автоматизованих системах складської логістики має кілька ключових завдань:

Забезпечення безпеки технологічних процесів і обладнання: Впровадження автоматизованих систем, таких як AGV-роботи та RFID, вимагає, щоб усе обладнання відповідало стандартам безпеки, а процеси були спроектовані таким чином, щоб уникати аварійних ситуацій.

Попередження професійних захворювань і травматизму: наприклад, захист працівників від механічних травм, спричинених AGV-роботами, або від можливого впливу радіочастотного випромінювання RFID.

Створення комфортних умов праці: це включає контроль рівня шуму, ергономіку робочих місць і забезпечення працівників засобами індивідуального захисту.

Навчання працівників: регулярні інструктажі та тренінги допомагають операторам правильно реагувати на потенційні небезпеки та використовувати обладнання безпечно.

Значення в контексті автоматизації

Автоматизація складської логістики покращує ефективність і продуктивність, але водночас вводить нові виклики для охорони праці. Наприклад, AGV-роботи, які рухаються зі швидкістю до 2 м/с і мають вагу до 1 тонни, можуть становити загрозу через зіткнення або наїзди, якщо не дотримуватися заходів безпеки. Аналогічно, RFID-системи генерують радіочастотне випромінювання, яке хоч і вважається безпечним на низьких рівнях, потребує моніторингу при тривалому впливі. Таким чином, охорона праці в цьому контексті вимагає комплексного підходу, який поєднує технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні заходи для адаптації до цих нових ризиків.

4.2. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на оператора автоматизованої системи складської логістики

Оператори автоматизованих складських систем щодня взаємодіють із технологіями, які, попри свою ефективність, можуть створювати небезпечні та

шкідливі фактори. Ці фактори поділяються на фізичні, механічні, електромагнітні та психофізіологічні, і їхній аналіз є ключовим для розробки ефективних заходів безпеки.

Основні небезпечні та шкідливі фактори

Механічні ризики від AGV-роботів. AGV-роботи (автоматизовані керовані транспортні засоби) є невід'ємною частиною сучасних складів, але їхній рух може становити серйозну загрозу. Зіткнення або наїзди можуть призвести до травм, особливо враховуючи їхню швидкість (до 2 м/с) і вагу (до 1 тонни). За даними OSHA, у США щороку фіксується близько 100 інцидентів із AGV, з яких 10% закінчуються травмами.

Радіочастотне випромінювання від RFID. RFID-системи використовуються для ідентифікації та відстеження товарів, але вони генерують радіочастотне випромінювання на частотах 13.56 МГц (HF) або 860-960 МГц (UHF). Хоча рівень випромінювання зазвичай не перевищує 1 Вт і відповідає нормам ICNIRP, тривалий вплив при високій щільності зчитувачів (наприклад, 10 зчитувачів на 100 м²) може викликати занепокоєння.

Шум від обладнання. Мотори AGV, конвеєри та інше обладнання можуть генерувати шум до 85 дБ, що перевищує допустиму норму (80 дБ за 8 годин), створюючи ризик втрати слуху при тривалій роботі без захисту.

Психофізіологічні фактори. Постійний контроль автоматизованих систем може викликати стрес і втому, особливо під час збоїв або аварій. Монотонність роботи, як-от моніторинг екранів, також знижує увагу, підвищуючи ймовірність помилок.

Вплив радіочастотного випромінювання RFID на працівників

Радіочастотне випромінювання від RFID-зчитувачів є неіонізуючим і має низьку енергію, що не призводить до пошкодження ДНК. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), короточасний вплив на рівнях, нижчих за норми ICNIRP (2 Вт/кг для голови і тулуба), не викликає негативних ефектів. У

складських умовах середній рівень випромінювання від одного зчитувача становить 0,1-0,5 Вт/м², що значно нижче норми (10 Вт/м² для UHF). Однак при щільності 10 зчитувачів на 100 м² сукупний рівень може сягати 5 Вт/м², що все ще безпечно, але потребує регулярного моніторингу.

Тривалий вплив (8 годин/день) на рівні, близькі до граничних, може викликати тепловий ефект, тобто нагрівання тканин, хоча таких випадків у реальних умовах поки не зафіксовано. Дослідження показують, що пасивні RFID-системи з низькою потужністю не становлять значного ризику, але для повної впевненості потрібні додаткові довгострокові дослідження, особливо в умовах високої автоматизації складів.

Вимоги до безпечної експлуатації AGV-роботів

AGV-роботи потребують чітких правил експлуатації, щоб уникнути травматизму:

Системи безпеки: AGV повинні бути оснащені датчиками наближення (дальність 1-2 м), які зупиняють роботу при виявленні людини, аварійними кнопками (реакція за 0,1 секунди) та звуковими/світловими сигналами (85 дБ, 1000 люкс).

Обмеження швидкості: у зонах із працівниками швидкість AGV не повинна перевищувати 1 м/с, у відокремлених зонах – до 2 м/с.

Навчання: працівники повинні проходити інструктажі з правил поведінки в зонах руху AGV, включаючи заборону наближатися на відстань менше 1 м і перетинати їхні маршрути.

Ці вимоги дозволяють мінімізувати механічні ризики та забезпечити безпечну взаємодію між людьми й автоматизованими системами.

4.3. Заходи з техніки безпеки для зменшення або усунення впливу шкідливих факторів при обслуговуванні автоматизованої системи складської логістики.

Для забезпечення безпеки працівників у автоматизованих складських системах необхідно впроваджувати комплексні заходи з техніки безпеки, які охоплюють організаційні, технічні та санітарно-гігієнічні аспекти.

Організаційні заходи.

Навчання та інструктажі: регулярні тренінги з безпечної роботи з AGV і RFID, включаючи процедури аварійного вимкнення (натискання кнопки за 0,1 секунди) і правила поведінки в зонах руху роботів (не перетинати шляхи AGV).

Розробка інструкцій: створення детальних посібників із техніки безпеки для кожного типу обладнання (AGV, RFID, конвеєри), які описують правила експлуатації, обслуговування та дії в аварійних ситуаціях.

Контроль доступу: обмеження доступу до зон високого ризику (наприклад, маршрутів AGV) лише для навчених працівників за допомогою пропускних систем (картки, біометрія).

Технічні заходи.

Захисні бар'єри: встановлення огорож (висота 2 м, міцність 500 Н/м) навколо зон руху AGV і конвеєрів для запобігання випадковому входу.

Датчики безпеки: оснащення AGV датчиками наближення (дальність 1-2 м, кут 180°), які автоматично зупиняють роботу при виявленні людини (реакція за 0,05 секунди).

Аварійні кнопки: розташування кнопок зупинки кожні 10 м уздовж шляхів AGV і на конвеєрах із реакцією за 0,1 секунди.

Сигналізація: використання сирен (85 дБ) і миготливих ламп (1000 люкс) для попередження про рух AGV або активацію обладнання.

Санітарно-гігієнічні заходи.

Моніторинг випромінювання: регулярні вимірювання рівня радіочастотного випромінювання (кожні 6 місяців) за допомогою детекторів електромагнітного випромінювання (точність 0,01 Вт/м²) для дотримання норми 10 Вт/м².

Захисне обладнання: надання працівникам шоломів (EN 397), взуття з металевими носками (EN ISO 20345) і жилетів високої видимості (EN ISO 20471). Екрановані костюми для захисту від випромінювання не є обов'язковими через його низький рівень.

Ергономіка: налаштування робочих місць (висота столу 75 см, кут монітора 15°) для зменшення навантаження на спину та очі.

Заходи для конкретних факторів

Для AGV: обмеження швидкості до 1 м/с у зонах із людьми, регулярне технічне обслуговування (кожні 1000 годин), встановлення захисних бар'єрів.

Для RFID: розташування зчитувачів на відстані від робочих місць (не менше 1 м), використання низькопотужних моделей (до 1 Вт), інформування працівників про безпечні рівні випромінювання.

Для шуму: встановлення шумопоглинаючих панелей (зниження на 10 дБ), надання захисних навушників (зниження на 20 дБ).

Ці заходи дозволяють знизити ризики до прийняттого рівня та забезпечити безпечну експлуатацію автоматизованих систем.

Висновки до розділу 4

Охорона праці в автоматизованих системах складської логістики відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки та здоров'я працівників. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів показав, що оператори стикаються з механічними ризиками від AGV-роботів (зіткнення, наїзди), радіочастотним випромінюванням від RFID, шумом і психофізіологічними навантаженнями.

Радіочастотне випромінювання від RFID залишається в межах безпечних норм (до 5 Вт/м² при нормі 10 Вт/м²), але потребує моніторингу при високій щільності зчитувачів. Основні ризики від AGV-роботів пов'язані із зіткненнями, які можна зменшити за допомогою датчиків наближення, захисних бар'єрів і навчання.

Комплексні заходи з техніки безпеки, включаючи захисне обладнання (шоломи, жилети), технічні засоби (аварійні кнопки, сигнали) та організаційні дії (інструктажі, контроль доступу), ефективно знижують ці ризики. Автоматизація складських операцій може бути безпечною за умови суворого дотримання норм охорони праці та регулярного моніторингу умов роботи, що дозволяє адаптуватися до нових технологічних викликів.

ВИСНОВКИ

Дана робота присвячена розробці, тестуванню та аналізу автоматизованої системи складської логістики на базі AGV-роботів і технології RFID.

Проаналізовані існуючі системи автоматизації складської логістики, розроблена система автоматизації, проведений її тестування та аналіз ефективності.

Основні висновки роботи наступні.

Актуальність автоматизації: аналіз сучасних технологій у розділі 1 підтвердив, що автоматизація складської логістики є ключовим фактором підвищення конкурентоспроможності підприємств. Використання AGV і RFID дозволяє скоротити час обробки замовлень на 30-50%, підвищити точність обліку до 99,9% і оптимізувати використання складських площ, що відповідає сучасним вимогам швидкості та ефективності.

Розробка системи: у розділі 2 детально описано створення системи, включаючи вибір AGV-робота MiR250, RFID-сканера Zebra FX9600, програмного забезпечення SAP EWM, інтеграцію RFID та проектування багатопов'язаної архітектури. Система забезпечує високу продуктивність і надійність завдяки сучасним технологіям і швидкому обміну даними, створюючи основу для автоматизованого управління складом.

Тестування та ефективність: розділ 3 показав, що комп'ютерне моделювання в Anylogic дозволило оптимізувати конфігурацію системи (15 AGV підвищують продуктивність на 28% порівняно з 10). Тестування RFID-взаємодії підтвердило точність відстеження на рівні 99%, а аналіз ефективності продемонстрував зростання продуктивності на 50% порівняно з традиційними методами, хоча виявив потребу в оптимізації енергоспоживання.

Охорона праці: у розділі 4 проаналізовано ризики, пов'язані з AGV (механічні травми) і RFID (радіочастотне випромінювання), та запропоновано заходи для їх мінімізації (датчики безпеки, навчання персоналу, моніторинг умов

праці). Це забезпечує безпечну експлуатацію системи за умов дотримання стандартів.

Розроблена система є перспективним рішенням для сучасних складів, значно підвищуючи ефективність, точність і безпеку операцій. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на зниження енергоспоживання, інтеграцію штучного інтелекту для прогнозування попиту та вдосконалення ергономіки робочих місць, що зробить систему ще більш конкурентоспроможною та екологічною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Andiappillai N. Factors Influencing the Successful Implementation of the Warehouse Management System (WMS). 2020. 10 с.
2. AnyLogic. AnyLogic Simulation Software. – \[Електронний ресурс]: (<https://www.anylogic.com/>) (дата звернення: 25.04.2025).
3. Larry M. Robots in Warehousing. 2021. – \[Електронний ресурс]: (<https://www.robotics.org/userAssets/riaUploads/file/>) (дата звернення: 25.04.2025).
4. Mingxing Deng, Jian Mao and Xingwen Gan. Development of Automated Warehouse Management System. 2018 2nd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE 2018). Published online: 19 November 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823203051>
5. Mobile Industrial Robots. MiR Charge 48V. – \[Електронний ресурс]: (<https://mobile-industrial-robots.com/products/applications/mir-charge-48v>) (дата звернення: 25.04.2025).
6. Mobile Industrial Robots. MiR250. – \[Електронний ресурс]:(<https://mobile-industrial-robots.com/products/robots/mir250>) (дата звернення: 25.04.2025).
7. Mobile Industrial Robots. MiR250 Specifications. – \[Електронний ресурс]: (<https://mobile-industrial-robots.com/products/robots/mir250/specifications>) (дата звернення: 25.04.2025).
8. RFID (Radio Frequency Identification). TechTarget. – \[Електронний ресурс]:(<https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/RFID-radio-frequency-identification>) (дата звернення: 25.04.2025).
9. SAP. SAP Extended Warehouse Management. – \[Електронний ресурс]: (<https://www.sap.com/products/scm/extended-warehouse-management.html>) (дата звернення: 25.04.2025).

10. Zebra Technologies. FX9600 Fixed RFID Reader. – \[Електронний ресурс]:(<https://www.zebra.com/gb/en/products/spec-sheets/rfid/rfid-readers/fx9600.html>) (дата звернення: 25.04.2025).

11. Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш.Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 2. – 408 с.

12. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 49, ст.668 [Режим доступу]: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>

13. ДСТУ EN 15635:2016 Системи складські стаціонарні сталеві. Експлуатування та технічне обслуговування складського устаткування (EN 15635:2008, IDT)

14. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT)

15. Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2023): інженерія, матеріали, технології, транспорт : зб. наук. доп. міжнар. конф., Луцьк, Україна, 16–18 травня 2023 р. / упоряд.: О. Повстяной, О. Залета, Б. Валецький. – Луцьк: Вежа-Друк, 2023. – 276 с.

16. Подра О. П., Гомза К. І. Сучасні технології автоматизації складської діяльності підприємств. SMEU-archive. 2020. Випуск 4. Номер 2. с. 70-78. URL: <https://doi.org/10.23939/smeu2022.02.070>

17. Слюсар А. П., Хрустальова С. В. Використання новітніх логістичних технологій для оптимізації діяльності сучасних підприємств // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : матеріали 28-го Міжнар. молодіж. форуму, 16–18 квіт. 2024 р. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – Т. 2. – С. 47–50. – DOI: <https://doi.org/10.30837/IYF.ASCTREDB.2024.047>.