

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ФІТКАЙЛО МАРТА ВОЛОДИМИРІВНА

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СКЛАДСЬКОЇ СИСТЕМИ ТА АНАЛІЗ ЇЇ
ПРОДУКТИВНОСТІ/ MODELING OF AN AUTOMATED WAREHOUSE SYSTEM AND
ANALYSIS OF ITS PERFORMANCE

Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

Виконав студент групи МТІР-41
Фіткайло М.В.

Науковий керівник:
д.т.н., проф. Николайчук Я.М.

Бакалаврську роботу допущено до захисту:

;____;_____2026р.

Завідувач кафедри

_____ А.І. Сергін

Тернопіль 2026

Західноукраїнський національний університет
Навчально-науковий інститут новітніх освітніх технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
Спеціальність: 152 - Інформаційно-вимірювальні технології
Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

А.І.Сегін

“ ” 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ
Фіткайло Марти Володимирівни
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Моделювання автоматизованої складської системи та аналіз її продуктивності/
Modeling of an Automated Warehouse System and Analysis of Its Performance

Керівник роботи д.т.н., Николайчук Я.М.

затверджені наказом по університету від 01.12.2025 р №894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи:
10.05.2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Автоматизовані системи зберігання та видачі вантажів (AS/RS), складське обладнання та логістичні процеси.

2. Інформаційні системи управління складом (WMS, WCS), засоби автоматизації та моніторингу складських операцій.

3. Методи математичного та імітаційного моделювання складських систем, алгоритми оптимізації розміщення і транспортування вантажів.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз сучасних методів автоматизації складських приміщень та інформаційних систем управління складом.

2. Розробити математичну модель оптимізації розподілу товарів у складському просторі.

3. Реалізувати алгоритм оптимального розміщення вантажів на основі методу Tabu Search.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1.	Структурна схема автоматизованої вагонетки
2.	Блок схема алгоритму роботи контролера вагонетки

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Николайчук Я.М.		
2	Николайчук Я.М.		
3	Николайчук Я.М.		

7. Дата видачі завдання 5 грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз методів автоматизації складських приміщень	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Моделювання роботи автоматизованого складу	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Експериментальне дослідження та опрацювання ефективності системи	01.05.2026р. – 25.05.2026р.	

Студент

Фіткайло М.В.

(підпис)

Керівник роботи

д.т.н., Николайчук Я.М.

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Фіткайло М.В. Моделювання автоматизованої складської системи та аналіз її продуктивності. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна (наукова) програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

У роботі розглянуто процес моделювання та дослідження автоматизованої системи управління складським приміщенням. Проведено аналіз сучасних методів автоматизації складських комплексів, автоматизованих систем зберігання та видачі вантажів, а також інформаційних систем управління складом класів WMS і WCS. На основі проведеного аналізу сформовано вимоги до автоматизованої складської системи та розроблено її структурну модель.

Розроблено математичну модель автоматизованого складу, що включає підсистеми транспортування, палетизації та зберігання вантажів. Запропоновано алгоритм оптимізації розміщення товарів у складському просторі на основі методу Tabu Search, який забезпечує раціональний розподіл вантажів і підвищення ефективності використання складських ресурсів. Також розроблено структурні схеми керування основними підсистемами автоматизованого складу та реалізовано комп'ютерну модель для дослідження їх функціонування.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованого підходу щодо скорочення часу обробки вантажів, підвищення продуктивності складського обладнання та оптимізації використання складського простору.

ANNOTATION

Fitkailo M.V. Modeling of an Automated Warehouse System and Analysis of Its Performance. - Manuscript.

Doctoral studies for the education level «Bachelor'» with the title 151 Automation and Computer-Integrated Technologies. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The paper considers the process of modeling and investigating an automated warehouse management system. An analysis of modern methods for warehouse automation, automated storage and retrieval systems, as well as Warehouse Management Systems (WMS) and Warehouse Control Systems (WCS), was conducted. Based on the performed analysis, the requirements for an automated warehouse system were formulated and its structural model was developed.

A mathematical model of an automated warehouse was developed, incorporating transportation, palletizing, and storage subsystems. An algorithm for optimizing product placement within the warehouse space based on the Tabu Search method was proposed. The algorithm ensures rational allocation of goods and improves the efficiency of warehouse resource utilization. In addition, control structures for the main subsystems of the automated warehouse were designed, and a computer simulation model was implemented to investigate their operation.

Experimental studies confirmed the effectiveness of the proposed approach in reducing cargo handling time, increasing warehouse equipment productivity, and optimizing the utilization of storage space. The developed system can be applied in the design of modern logistics centers, automated warehouse complexes, and manufacturing enterprises where efficient management of storage, transportation, and cargo handling processes is required.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ.....	11
1.1 Особливості функціонування сучасних складських комплексів.....	11
1.2 Автоматизовані складські системи та принципи їх роботи.....	13
1.3 Аналіз інформаційних систем управління складом.....	17
2. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО СКЛАДУ.....	22
2.1 Система керування складським приміщенням.....	22
2.2 Загальний склад системи зберігання.....	26
2.3 Алгоритм рішення та аналіз моделі оптимізації розподілу вантажів.....	36
3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ	44
3.1 Вибір середовища проектування.....	44
3.2 Реалізація запропонованого підходу.....	50
3.3 Реалізація алгоритму оптимального розміщення товарів.....	59
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65
ДОДАТОК А. Світлокопія апробації роботи.....	68

					ДП.МТІР.9702396.00.00.00.000 ПЗ			
Розроб	Фіткайло М.В.				Моделювання автоматизованої складської системи та аналіз її продуктивності/ Modeling of an Automated Warehouse System and Analysis of Its Performance	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив	Николайчук Я.							
Консульт	Николайчук Я.					ЗУНУ.ФКІТ.МТІРЗ-41		
Н.Контроль	Николайчук Я.							
Затвердив	Сегін А.І.							

ВСТУП

Актуальність роботи зумовлена стрімким розвитком логістичних технологій, зростанням обсягів товарообігу та підвищенням вимог до ефективності управління складськими процесами. У сучасних умовах складські комплекси є важливим елементом логістичної інфраструктури підприємств, від роботи яких залежить швидкість обробки замовлень, якість обслуговування клієнтів, рівень використання ресурсів та загальна конкурентоспроможність компанії. Традиційні методи організації складської діяльності часто не забезпечують необхідного рівня продуктивності через значний вплив людського фактора, обмежені можливості контролю та складність оптимізації процесів зберігання і переміщення вантажів.

Сучасний розвиток інформаційних технологій, робототехніки та систем автоматизованого керування створює передумови для впровадження інтелектуальних складських систем, здатних забезпечити високий рівень автоматизації логістичних процесів. Використання автоматизованих систем зберігання та видачі вантажів (AS/RS), систем управління складом (WMS), систем керування обладнанням (WCS), роботизованих маніпуляторів, конвеєрних ліній та автономних транспортних засобів дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи складу, знизити експлуатаційні витрати та мінімізувати кількість помилок під час виконання складських операцій.

Особливої актуальності набуває застосування технологій комп'ютерного моделювання для проектування та аналізу роботи автоматизованих складських комплексів. Створення віртуальних моделей дозволяє досліджувати поведінку системи в різних умовах експлуатації, оцінювати ефективність алгоритмів керування, прогнозувати навантаження на обладнання та виявляти можливі недоліки ще на етапі проектування. Використання тривимірного моделювання та цифрових двійників сприяє зниженню витрат на розробку, модернізацію та впровадження складських систем.

					ДП.МТІР.9702474.00.00.00.000 ПЗ	

Додаткову актуальність дослідженню надає необхідність оптимізації процесу розміщення товарів у складському просторі. Раціональний розподіл вантажів безпосередньо впливає на час виконання операцій завантаження та розвантаження, продуктивність штабелерів, ефективність використання складських площ та рівень завантаження обладнання. Для вирішення таких задач доцільним є застосування сучасних методів оптимізації, зокрема алгоритму Tabu Search, який дозволяє знаходити близькі до оптимальних рішення для складних багатокритеріальних задач.

Мета роботи. Метою роботи є розробка та дослідження моделі автоматизованої системи управління складським приміщенням, а також підвищення ефективності складських процесів шляхом використання сучасних засобів автоматизації, комп'ютерного моделювання та алгоритмів оптимізації розміщення вантажів.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних методів автоматизації складських приміщень та інформаційних систем управління складом.
2. Розробити модель системи керування автоматизованим складом.
3. Розробити математичну модель оптимізації розподілу товарів у складському просторі.
4. Реалізувати алгоритм оптимального розміщення вантажів на основі методу Tabu Search.
5. Виконати експериментальне оцінювання ефективності запропонованої системи та проаналізувати отримані результати.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес функціонування автоматизованих складських комплексів.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є методи та засоби автоматизації управління складськими приміщеннями, моделювання логістичних процесів та алгоритми оптимізації розміщення вантажів.

Методи дослідження.

					ДП.МТІР.9702474.00.00.00.000 ПЗ	8

У роботі використано методи аналізу та узагальнення науково-технічної літератури для дослідження сучасних підходів до автоматизації складських комплексів та інформаційних систем управління складом; методи системного аналізу для побудови структури автоматизованої складської системи; методи математичного моделювання для розроблення моделі функціонування автоматизованого складу та оптимізації процесів розміщення вантажів; методи комбінаторної оптимізації, зокрема алгоритм Tabu Search, для пошуку раціонального розподілу товарів у складському просторі; методи комп'ютерного та імітаційного моделювання для дослідження роботи складської системи та оцінювання її ефективності; методи порівняльного аналізу для оцінювання показників продуктивності, використання складських ресурсів і якості функціонування автоматизованого складу.

Практичне значення одержаних результатів.

Практична значущість одержаних результатів полягає у можливості використання розробленої моделі для проектування та дослідження автоматизованих складських комплексів різного призначення. Використання запропонованого підходу дозволяє:

- підвищити ефективність роботи складського обладнання;
- скоротити час виконання операцій зберігання та відвантаження товарів;
- зменшити вплив людського фактора на логістичні процеси;
- оптимізувати використання складських площ;
- підвищити точність керування матеріальними потоками;
- забезпечити можливість попереднього тестування алгоритмів керування у віртуальному середовищі.

Результати роботи можуть бути використані під час проектування автоматизованих логістичних центрів, складських комплексів промислових підприємств, розподільчих центрів торговельних мереж та інших об'єктів, де виникає потреба в автоматизації процесів зберігання, транспортування та обробки вантажів. Отримані результати також можуть бути використані для подальших досліджень у сфері цифрового моделювання логістичних систем,

розробки інтелектуальних систем управління складом та вдосконалення алгоритмів оптимізації складських процесів.

Апробація. Фіткайло М., Мороз Т. Архітектура автоматизованої складської системи на основі удосконаленого алгоритму TABU SEARCH. – Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» (AKIT-2026), Тернопіль, 2026. – 233-236с.

					ДП.МТІР.9702474.00.00.00.000 ПЗ	10

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

1.1 Особливості функціонування сучасних складських комплексів

У сучасних умовах розвитку логістики та виробництва складські комплекси є невід'ємною складовою ланцюга постачання, що забезпечує безперервність руху матеріальних потоків від виробника до кінцевого споживача. Ефективність функціонування складської системи безпосередньо впливає на швидкість виконання замовлень, рівень обслуговування клієнтів, витрати підприємства та його конкурентоспроможність на ринку. У зв'язку зі зростанням обсягів товарообігу, розширенням асортименту продукції та підвищенням вимог до оперативності логістичних процесів особливого значення набуває питання автоматизації складської діяльності.

Складський комплекс являє собою сукупність технічних засобів, обладнання, інформаційних систем і персоналу, призначених для виконання операцій приймання, розміщення, зберігання, комплектування та відвантаження товарів. Основним завданням складу є забезпечення необхідного рівня запасів продукції та організація їх ефективного переміщення між окремими етапами логістичного процесу. При цьому склад виконує не лише функцію зберігання матеріальних ресурсів, а й забезпечує їх сортування, пакування, консолідацію та підготовку до подальшого транспортування.

Процес функціонування сучасного складського комплексу починається з приймання товарів. На цьому етапі здійснюється перевірка кількості та якості продукції, реєстрація надходження товарів до інформаційної системи та їх ідентифікація за допомогою штрихкодів або RFID-міток. Після завершення процедури приймання товари розміщуються у відповідних зонах зберігання. Вибір місця розташування продукції залежить від її габаритів, ваги, частоти використання та інших характеристик. Рациональне розміщення товарів дозволяє зменшити час пошуку та переміщення продукції під час виконання замовлень.

Наступним етапом є зберігання товарів, яке передбачає підтримання необхідних умов для забезпечення збереження продукції та ефективного

					ДП.МТІР.9702474.00.00.00.000 ПЗ	11

використання складських площ. У сучасних складських комплексах використовуються багаторівневі стелажні системи, автоматизовані комірки зберігання та високощільні системи розміщення вантажів. Ефективність використання складського простору визначається коефіцієнтом завантаження складу, який характеризує частку зайнятих місць зберігання відносно загальної місткості складського комплексу.

Однією з найважливіших складських операцій є комплектування замовлень. Цей процес полягає у відборі необхідних товарів зі складу відповідно до вимог клієнта або виробничого підрозділу. Комплектування є однією з найбільш трудомістких операцій складської логістики та може займати понад половину загального часу обробки замовлення. Від ефективності організації цього процесу значною мірою залежить продуктивність роботи складу. Для скорочення часу комплектування використовуються сучасні алгоритми маршрутизації, автоматизовані системи відбору товарів та роботизовані транспортні засоби.

Завершальним етапом роботи складу є відвантаження продукції. Під час виконання цієї операції здійснюється перевірка комплектності замовлення, оформлення супровідної документації, пакування та передача товарів транспортним засобам для подальшого перевезення. Швидкість виконання операцій відвантаження безпосередньо впливає на рівень обслуговування клієнтів та своєчасність доставки продукції.

Незважаючи на значний розвиток складських технологій, традиційні склади мають низку суттєвих недоліків. Однією з основних проблем є значні витрати часу на пошук товарів та виконання складських операцій. У разі використання паперової документації або недостатньо автоматизованих інформаційних систем працівники витрачають значний час на визначення місця зберігання продукції та перевірку її наявності. Це призводить до збільшення тривалості обробки замовлень і зниження загальної продуктивності складу.

Іншою поширеною проблемою є виникнення помилок обліку товарів. Людський фактор може призводити до неточностей під час приймання,

переміщення або відвантаження продукції. Наслідком таких помилок є розбіжності між фактичними та обліковими залишками товарів, що негативно впливає на якість управління запасами та може спричинити фінансові втрати підприємства.

Суттєвою проблемою також є нерівномірне завантаження персоналу та складського обладнання. У періоди підвищеної активності окремі працівники можуть бути перевантажені роботою, тоді як інші ресурси використовуються неефективно. Подібна ситуація призводить до збільшення часу виконання операцій та зниження пропускної здатності складського комплексу.

Крім того, традиційні методи організації складської діяльності часто не забезпечують оптимального використання складського простору. Нераціональне розміщення товарів спричиняє збільшення відстаней переміщення персоналу та техніки, що безпосередньо впливає на витрати часу та енергетичних ресурсів. За умов постійного зростання обсягів товарообігу така проблема стає особливо актуальною для великих логістичних центрів та виробничих підприємств.

Для усунення зазначених недоліків сучасні складські комплекси дедалі частіше впроваджують автоматизовані системи управління складом, роботизовані транспортні засоби, автоматичні стелажні системи та програмні засоби моделювання логістичних процесів. Автоматизація дозволяє підвищити точність обліку продукції, скоротити час виконання складських операцій, оптимізувати використання ресурсів і забезпечити високий рівень продуктивності складської системи. Саме тому дослідження методів програмного моделювання та автоматизації складських процесів є актуальним напрямом розвитку сучасних інформаційних технологій у сфері логістики.

1.2 Автоматизовані складські системи та принципи їх роботи

Сучасний розвиток логістики характеризується постійним зростанням обсягів товарообігу, збільшенням номенклатури продукції та підвищенням вимог до швидкості виконання складських операцій. За таких умов традиційні

					ДП.МТІР.9702474.00.00.00.000 ПЗ	13

методи організації складського господарства вже не забезпечують необхідного рівня продуктивності та точності обліку. Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку складської логістики є впровадження автоматизованих складських систем класу AS/RS (Automated Storage and Retrieval System), які дозволяють виконувати операції зберігання та видачі товарів із мінімальним втручанням людини.

Автоматизована складська система являє собою комплекс програмних та апаратних засобів, призначених для автоматичного розміщення, зберігання, пошуку та відбору товарів. Основною метою використання AS/RS є підвищення ефективності використання складських площ, скорочення часу обробки замовлень, зменшення кількості помилок під час обліку товарів і зниження експлуатаційних витрат. На відміну від традиційних складів, де більшість операцій виконується працівниками, автоматизовані системи використовують спеціалізоване обладнання та програмне забезпечення для керування всіма етапами складського процесу.

Типова автоматизована складська система складається зі стележного обладнання, транспортних механізмів, засобів ідентифікації продукції, систем керування та програмного забезпечення. Центральним елементом є стележна система, яка забезпечує зберігання продукції в комірках, що мають унікальні координати. Використання багаторівневих стележів дозволяє значно збільшити щільність зберігання продукції та ефективно використовувати вертикальний простір складських приміщень.

Для транспортування вантажів між зонами складу застосовуються штабелери. Вони виконують переміщення товарів у горизонтальній та вертикальній площинах, забезпечуючи доступ до будь-якої комірки стележної системи. Саме від швидкості та точності роботи штабелера значною мірою залежить загальна продуктивність автоматизованого складу. У дослідженій статті штабелер розглядається як основний виконавчий механізм системи, що здійснює як розміщення товарів у комірках, так і їх подальше вилучення для відвантаження.

Для організації безперервного потоку матеріалів широко використовуються конвеєрні системи. Вони забезпечують автоматичне переміщення товарів між зонами приймання, зберігання, комплектування та відвантаження. Перевагою конвеєрів є висока продуктивність та можливість інтеграції з іншими складськими підсистемами. Проте використання конвеєрного обладнання потребує значних початкових інвестицій і часто обмежує можливість швидкої зміни конфігурації складу.

В останні роки все більшого поширення набувають роботизовані маніпулятори та автоматизовані транспортні засоби AGV (Automated Guided Vehicle). Роботизовані маніпулятори виконують операції сортування, пакування та палетування товарів, тоді як AGV-візки забезпечують автономне транспортування вантажів між різними зонами складу. Використання таких рішень дозволяє значно зменшити фізичне навантаження на персонал та підвищити безпеку виконання складських операцій. Разом із тим впровадження роботизованих систем супроводжується високою вартістю обладнання та складністю інтеграції з існуючою інфраструктурою підприємства.

Важливою складовою автоматизованого складу є система автоматичного контролю та керування. У сучасних складських комплексах для цього використовуються системи класу WMS (Warehouse Management System) та WCS (Warehouse Control System). WMS забезпечує управління запасами, облік товарів, формування завдань і контроль складських операцій, тоді як WCS відповідає за безпосереднє керування обладнанням складу. У сукупності ці системи забезпечують координацію роботи всіх технічних засобів і підтримують прийняття рішень щодо оптимального використання ресурсів складу.

Незважаючи на значні переваги автоматизованих складських систем, їх використання пов'язане з низкою проблем. Однією з основних є висока вартість впровадження. Для створення повноцінного автоматизованого складу необхідно придбати спеціалізоване обладнання, модернізувати інфраструктуру підприємства та впровадити програмне забезпечення для керування

логістичними процесами. Для середніх і малих підприємств такі витрати можуть бути економічно невиправданими.

Іншою проблемою є складність адаптації автоматизованих систем до змінних умов роботи. Більшість автоматизованих складів проектується для певного типу продукції та визначених обсягів товарообігу. У разі зміни номенклатури товарів або різкого збільшення навантаження можуть виникати проблеми з продуктивністю та ефективністю використання обладнання. Це вимагає застосування адаптивних алгоритмів керування та оптимізації складських процесів.

Суттєвим недоліком багатьох існуючих AS/RS-рішень є недостатня увага до оптимізації розміщення товарів. У більшості випадків система орієнтується лише на наявність вільної комірки, не враховуючи частоту використання продукції, відстані переміщення або навантаження на стелажну конструкцію. Як наслідок, навіть високий рівень автоматизації не гарантує максимальної ефективності роботи складу. Саме ця проблема стала предметом дослідження в роботі Huijun Di, де запропоновано використовувати алгоритми оптимізації для визначення найбільш раціонального розташування вантажів на складі [17]. У таблиці 1.1 здійснено порівняння традиційного та автоматизованого складу.

Таблиця 1.1 - Порівняння традиційного та автоматизованого складу

Критерій	Традиційний склад	Автоматизований склад AS/RS
Облік товарів	Переважно ручний або частково автоматизований	Повністю автоматизований
Швидкість обробки замовлень	Середня або низька	Висока
Точність обліку	Залежить від людського фактора	Висока точність
Витрати на персонал	Значні	Знижені

Продовження таблиці 1.1

Використання складського простору	Середнє	Максимально ефективне
Ризик помилок	Високий	Мінімальний
Масштабованість	Обмежена	Висока
Початкові інвестиції	Невеликі	Значні
Гнучкість впровадження	Висока	Середня
Залежність від програмного забезпечення	Низька	Висока
Продуктивність	Обмежена людськими ресурсами	Визначається технічними характеристиками системи
Можливість оптимізації	Обмежена	Широкі можливості застосування алгоритмів оптимізації

Проведений аналіз показує, що автоматизовані складські системи мають суттєві переваги порівняно з традиційними технологіями зберігання товарів. Вони забезпечують підвищення швидкості виконання операцій, скорочення кількості помилок обліку, більш ефективно використання складського простору та зменшення залежності від людського фактора. Разом із тим існуючі рішення не завжди дозволяють досягти оптимального рівня продуктивності через недосконалість алгоритмів керування та розподілу товарів. Тому актуальним завданням є розроблення математичних моделей і програмних засобів, здатних оптимізувати роботу автоматизованого складу та забезпечити ефективно використання його ресурсів. Саме вирішенню цього завдання присвячені наступні розділи кваліфікаційної роботи.

1.3 Аналіз інформаційних систем управління складом

Стрімкий розвиток логістичних технологій та концепції цифрового підприємства сприяв широкому впровадженню інформаційних систем управління складом (Warehouse Management System, WMS), які забезпечують автоматизацію процесів приймання, зберігання, переміщення та відвантаження

товарів. На сучасних підприємствах WMS-системи стали невід’ємною складовою логістичної інфраструктури, оскільки дозволяють підвищити точність обліку запасів, оптимізувати використання складських площ та забезпечити контроль усіх операцій у режимі реального часу. Паралельно із розвитком WMS активно впроваджуються системи керування складським обладнанням (Warehouse Control System, WCS), які відповідають за взаємодію програмного забезпечення з автоматизованими транспортними системами, конвеєрами, роботизованими візками та іншими технічними засобами автоматизації складу.

Серед найбільш поширених рішень у сфері управління складськими процесами виділяють такі системи, як SAP Extended Warehouse Management, Oracle Warehouse Management, Manhattan Active Warehouse Management, Infor WMS та Microsoft Dynamics 365 Supply Chain Management [5]. Дані програмні продукти підтримують управління запасами в режимі реального часу, адресне зберігання, автоматичне планування складських операцій, використання технологій штрихового кодування та RFID, а також інтеграцію з корпоративними ERP-системами. Використання таких рішень дозволяє скоротити час виконання операцій та підвищити ефективність використання людських ресурсів. На рисунку 1.1 представлено архітектуру інформаційної системи управління складом.

Разом із тим аналіз сучасних WMS-рішень свідчить про наявність низки суттєвих обмежень. Насамперед варто відзначити високу вартість ліцензійного програмного забезпечення та його впровадження. Для середніх і малих підприємств витрати на придбання програмного забезпечення, серверного обладнання, терміналів збору даних та навчання персоналу можуть становити значну частину інвестиційного бюджету. Крім того, впровадження комплексних WMS-систем часто супроводжується необхідністю реорганізації бізнес-процесів підприємства, що потребує значних часових і кадрових ресурсів. Важливим недоліком також є залежність ефективності роботи системи від якості початкових даних. Помилки у довідниках товарів, місцях зберігання або

правилах маршрутизації можуть призвести до порушення логіки роботи всієї складської інфраструктури.

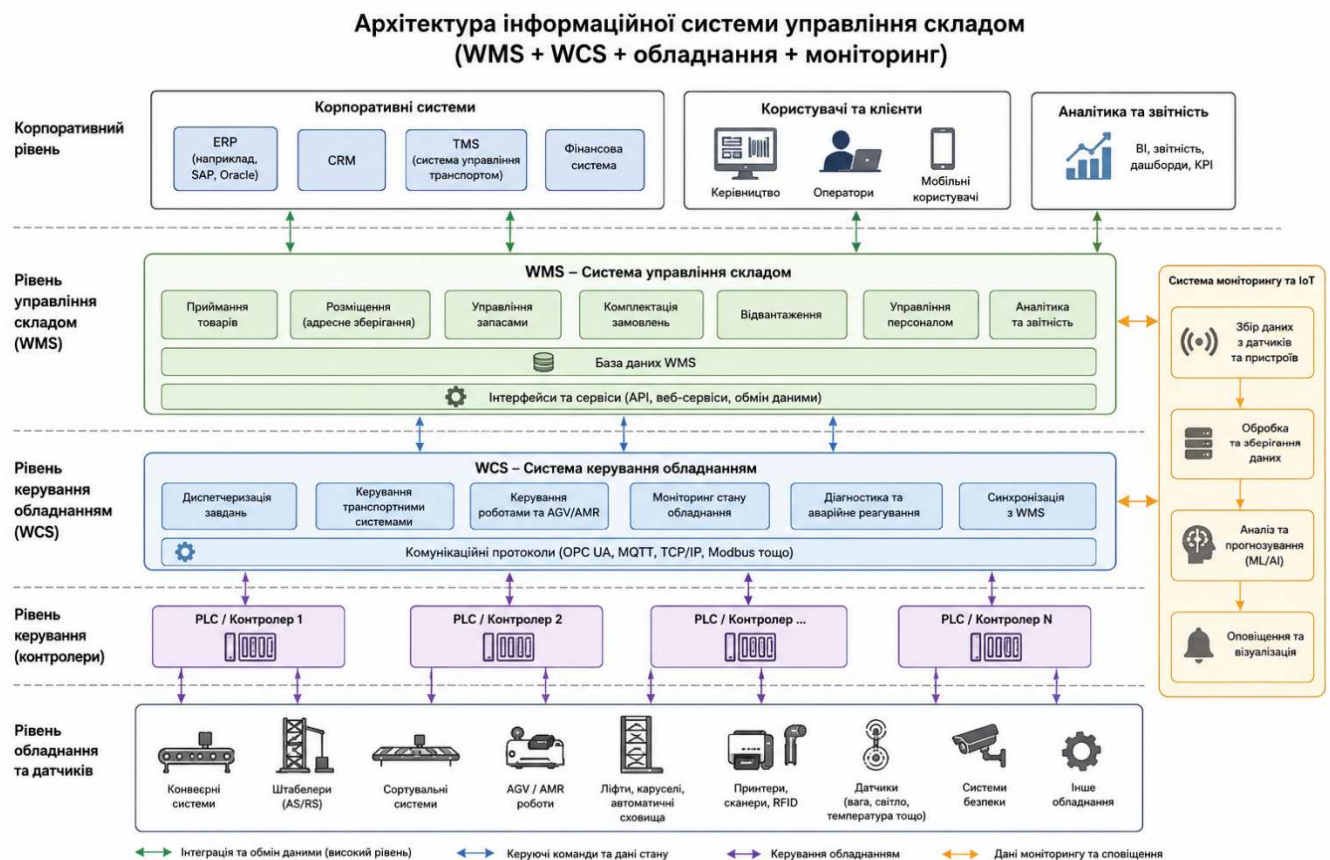


Рисунок 1.1 - Архітектура інформаційної системи управління складом

Особливе місце в автоматизованих складських комплексах займають системи класу WCS, які забезпечують взаємодію між програмним забезпеченням верхнього рівня та фізичним обладнанням складу. На відміну від WMS, що виконує функції планування та обліку, WCS відповідає за безпосереднє керування виконавчими механізмами та контроль їхнього стану. Такі системи забезпечують координацію роботи конвеєрів, сортувальників, автоматизованих штабелерів, AGV-роботів та інших пристроїв. Завдяки цьому досягається значне підвищення швидкості переміщення вантажів та мінімізація впливу людського фактора на виробничі процеси.

Проте використання WCS також супроводжується рядом проблем. Головною з них є висока залежність від справності обладнання та мережевої

інфраструктури. Вихід з ладу окремого елемента автоматизованої системи може призвести до зупинки значної частини складських операцій. Крім того, обладнання різних виробників часто використовує власні протоколи обміну даними, що ускладнює інтеграцію та підвищує вартість реалізації проєкту. Додатковими недоліками є необхідність регулярного технічного обслуговування, складність модернізації та обмежена гнучкість під час обробки нестандартних виробничих ситуацій.

Для узагальнення результатів аналізу проведено порівняння найбільш поширених систем управління складом.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика сучасних WMS-систем

Система	Основні можливості	Переваги	Недоліки
SAP EWM	Управління запасами, адресне зберігання, інтеграція з ERP, підтримка автоматизованих складів	Висока функціональність, масштабованість, підтримка великих підприємств	Висока вартість ліцензій та впровадження, складність налаштування
Oracle WMS	Управління запасами, логістичними процесами, аналітика	Розвинуті засоби аналітики та інтеграції	Значні вимоги до IT-інфраструктури, висока вартість супроводу
Manhattan WMS	Оптимізація складських операцій, управління замовленнями	Гнучкість налаштувань, підтримка омніканальної логістики	Складність освоєння та потреба у спеціалізованих консультантах
Infor WMS	Управління запасами, автоматизація процесів комплектування	Зручний інтерфейс, підтримка хмарних сервісів	Обмежені можливості кастомізації окремих модулів
Microsoft Dynamics 365 SCM	Інтеграція складських та бізнес-процесів	Простота інтеграції з екосистемою Microsoft	Менша спеціалізація для великих автоматизованих складів

Однією з ключових тенденцій розвитку складських інформаційних систем є інтеграція WMS і WCS у межах єдиного інформаційного середовища. Така архітектура дозволяє забезпечити автоматичну передачу завдань від системи управління складом до обладнання та отримувати інформацію про виконання операцій у режимі реального часу. Проте на практиці інтеграція супроводжується проблемами сумісності програмних інтерфейсів, затримками синхронізації даних та необхідністю забезпечення високої відмовостійкості програмно-апаратного комплексу.

Сучасні тенденції розвитку логістики також передбачають інтеграцію WMS і WCS з технологіями Інтернету речей (IoT), хмарними платформами та системами моніторингу стану обладнання [16]. Такі рішення дозволяють реалізувати прогнозне технічне обслуговування, автоматичний контроль параметрів навколишнього середовища та аналіз великих обсягів даних для прийняття управлінських рішень. Водночас збільшення кількості підключених пристроїв підвищує ризики кібербезпеки, збільшує складність адміністрування та вимагає додаткових витрат на захист інформації.

Таким чином, проведений аналіз показує, що сучасні інформаційні системи управління складом забезпечують високий рівень автоматизації логістичних процесів і є основою функціонування сучасних складських комплексів. Незважаючи на значні переваги у вигляді підвищення продуктивності, точності обліку та ефективності використання ресурсів, існуючі рішення характеризуються високою вартістю впровадження, складністю інтеграції та залежністю від технічної інфраструктури. Зазначені недоліки обґрунтовують актуальність розробки спеціалізованих програмно-апаратних систем управління складом, адаптованих до конкретних умов експлуатації та здатних забезпечити оптимальне співвідношення між функціональністю, вартістю та надійністю.

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО СКЛАДУ

2.1 Система керування складський приміщенням

У підрозділі розглядається структура сучасного автоматизованого складу та взаємодія його основних компонентів. На основі дослідженої статті автоматизований склад складається зі стелажної системи, штабелера, конвеєрної лінії, роботизованого маніпулятора, AGV-візків та системи автоматичного сортування. Аналізуються функції кожного елемента та їх роль у процесах приймання, зберігання, переміщення й відвантаження товарів.

Система керування складським транспортуванням використовує режим планування, який виявляє рух обладнання в режимі реального часу та постійно надає інформацію про рух у процесі транспортування. Система використовує автоматичний режим керування. Таким чином, віртуальний головний комп'ютер надсилає інструкції контролеру обладнання. Після отримання інструкцій контролер автоматично керує обладнанням для завершення операції та передає інформацію про стан руху обладнання віртуальному головному комп'ютеру.

Ця частина системи є сполучною ланкою між автоматизованою системою палетування готової продукції та автоматизованою складською системою. У цьому сценарії віртуального моделювання будуть використані високі стелажі, щоб забезпечити автоматичний вхід та вихід товарів, а також підвищити ефективність роботи. У цій статті штабелер використовується для доступу до товарів, а складська зона та зона зберігання з'єднані роликовим конвеєром. Автоматизований склад в основному складається з роликової конвеєрної лінії, штабелера, полиці, механічної руки, AGV-візка та інших частин.

Режим роботи автоматизованого складу такий: під час входу на склад працівник спочатку розміщує товар на роликовій конвеєрній лінії, а роликова конвеєрна лінія відправляє товар до складської зони. Потім штабелер знімає

товар з роликової конвеєрної лінії, і, нарешті, штабелер транспортує товар і розміщує його у призначеному контейнері. Під час виходу зі складу штабелер виймає товар з призначеного контейнера, потім розміщує товар на роликовій конвеєрній лінії та відправляє його до зони автоматичного сортування. Ідентифікаційний пристрій системи автоматичного сортування визначає, до якої смуги належить товар, за допомогою штрих-коду, конвеєр відправляє товар на відповідну смугу. Потім механічна рука акуратно розміщує товар на піддоні. Зрештою, автомобіль AGV доставляє товари та піддони до зони зберігання товарів. Загальне планування автоматизованого віртуального моделювання складу показано на рисунку 2.1.

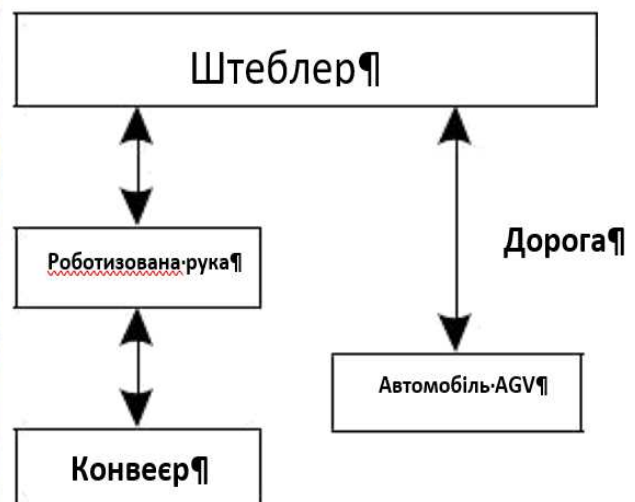


Рисунок 2.1 Загальне планування віртуального моделювання складу.

2.1.1 Загальна архітектура системи моделювання

3D-моделі полиць, штабелерів, конвеєрних стрічок, механічних важелів, піддонів, автоматичного сортувального обладнання та вагонів AGV на автоматизованому складі створюються за допомогою 3DMAX. Потім 3D-моделі автоматизованого складу імпортуються в рушій для рендерингу та відображення. Для більш точного відображення віртуального симуляційного дизайну до

штабелера, вантажу, візка AGV та механічного важеля в тривимірній моделі автоматизованого складу додаються дії. Загальна структура показана на рисунку 2.2.

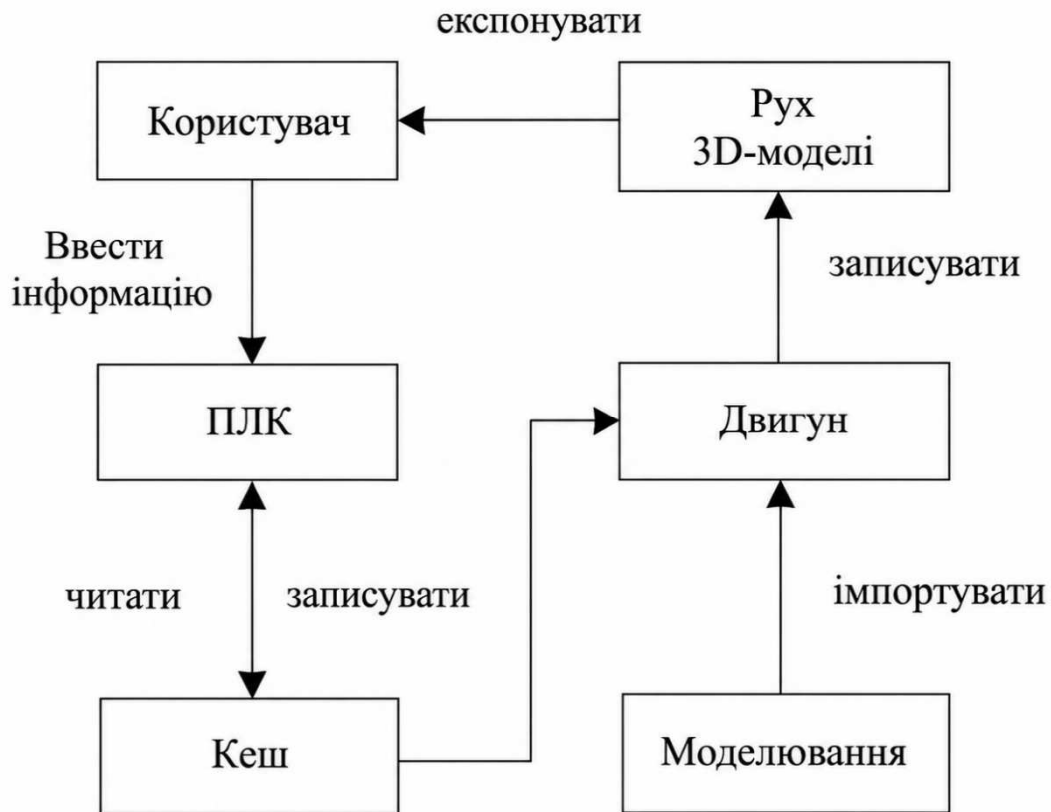


Рисунок 2.2 - Загальна схема каркасу.

На початковому етапі користувач вводить необхідні параметри або команди в систему. Це можуть бути дані про розміщення товарів, запуск процесу складування, налаштування обладнання чи інші керуючі дії. Введена інформація передається до ПЛК (програмованого логічного контролера), який виконує роль центрального елемента керування автоматизованим складом.

Далі ПЛК здійснює обмін даними з кеш-пам'яттю. У кеші тимчасово зберігаються поточні параметри роботи системи, сигнали датчиків, координати об'єктів та інша службова інформація. ПЛК записує нові дані до кешу та зчитує вже наявні дані для виконання логічних операцій і прийняття рішень щодо подальшої роботи обладнання.

Кеш-пам'ять передає накопичену інформацію до рушія візуалізації (двигуна). Рушій виступає програмним середовищем, яке відповідає за обробку даних та формування віртуального зображення складської системи. Саме тут виконується аналіз отриманих параметрів та їх перетворення у графічні команди для тривимірної моделі.

Паралельно до рушія надходять дані з модуля моделювання, де попередньо створюються тривимірні об'єкти складу. До таких об'єктів належать стелажі, штабелери, конвеєрні лінії, роботи-маніпулятори, піддони та транспортні засоби AGV. Створені моделі імпортуються до рушія для подальшого відображення та анімації. Після обробки інформації рушій записує результати до блоку руху 3D-моделі, який відповідає за відображення всіх змін у віртуальному середовищі. На основі отриманих даних здійснюється анімація руху обладнання, переміщення вантажів, робота конвеєрів і штабелерів, а також інші технологічні процеси автоматизованого складу.

На завершальному етапі сформована 3D-візуалізація демонструється користувачу. Таким чином користувач отримує можливість у режимі реального часу спостерігати за роботою автоматизованого складу, контролювати виконання операцій та оцінювати ефективність функціонування системи.

Основною метою даної архітектури є інтеграція реального керування складом через ПЛК із віртуальною системою моделювання. Це дозволяє:

- візуалізувати роботу автоматизованого складу в режимі реального часу;
- контролювати виконання логістичних операцій;
- тестувати алгоритми керування без використання реального обладнання;
- аналізувати продуктивність складської системи;
- виявляти помилки та оптимізувати процеси складування і відвантаження товарів.

Таким чином, схема демонструє повний цикл обробки даних: від введення інформації користувачем до формування та відображення тривимірної візуалізації роботи автоматизованого складу.

2.2 Загальний склад системи зберігання

У цьому підрозділі за допомогою тривимірного моделювання фізичної одиниці логістичного складу показано повну логістичну систему. За допомогою надійних засобів візуалізації для проектування та планування логістичної системи програму вдосконалено. Складна багатоцільова система оптимізації працюватиме з використанням різних параметрів. Потім отримуються статистичні результати для осіб, які приймають рішення.

На рисунку 2.3 між автоматизованим складом та кожним компонентом може бути реалізовано двосторонній обмін даними для своєчасного зворотного зв'язку. Наприклад, після отримання інструкцій від конвеєрної системи, конвеєр може передавати дані від початку до завершення транспортування товарів.

Чи буде вся система працювати безперебійно та ефективно, залежить від конструкції системи керування. Систему керування необхідно розробляти відповідно до певних характеристик товарів та частоти доступу до них. Вона повинна відповідати фактичним виробничим операціям, що не лише забезпечує необхідну роботу системи в цілому, але й підвищує загальну ефективність роботи, щоб система більше відповідала реальності. Керування системою головним чином включає керування. На рисунку 2.3 представлено структурну схему системи керування автоматизованим складом. Центральним елементом системи є контролер, який координує роботу всіх підсистем та забезпечує обмін інформацією між ними. Контролер отримує дані про стан обладнання, обробляє їх і надсилає відповідні команди виконавчим механізмам.

Система складається з трьох основних підсистем: системи палетизації, конвеєрної системи та системи складування. Кожна з них виконує окрему функцію в загальному логістичному процесі.

Система палетизації відповідає за автоматичне укладання продукції на піддони перед її транспортуванням або зберіганням. До її складу входять обладнання палетизації та конвеєр, який подає продукцію до місця укладання.

Конвеєрна система забезпечує переміщення вантажів між різними зонами складу. Вона складається з конвеєра, який транспортує продукцію відповідно до команд контролера та забезпечує безперервність матеріального потоку.

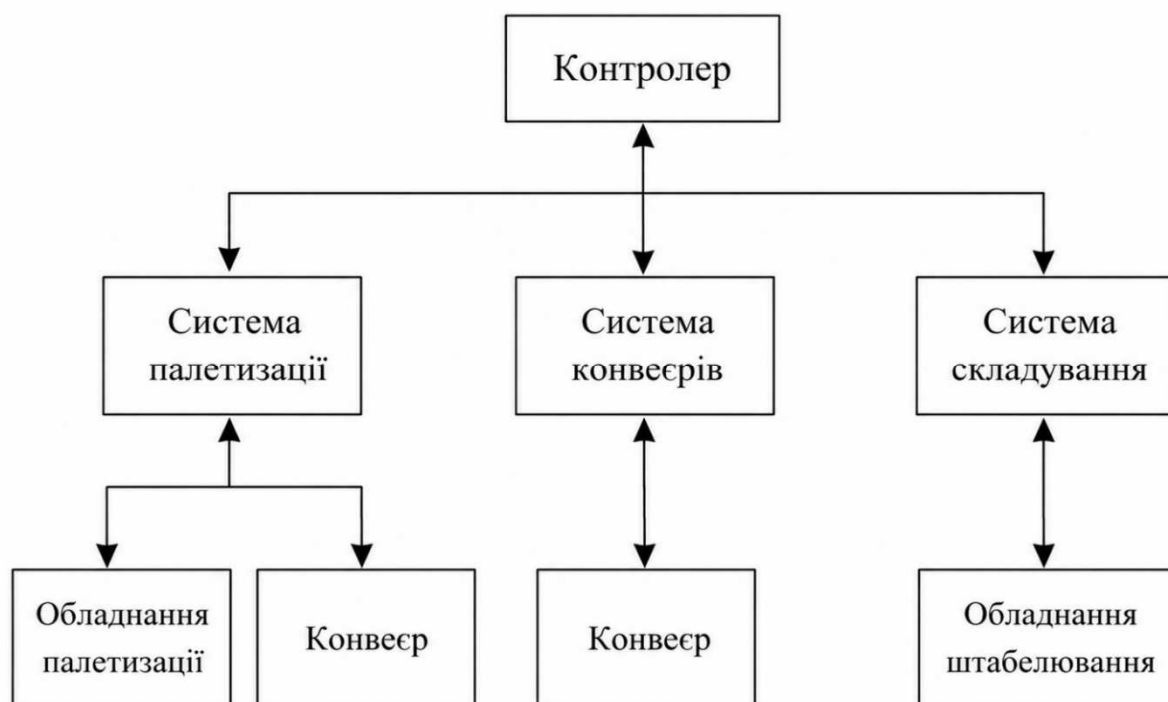


Рисунок 2.3 Структурна схема системи зберігання

Система складування призначена для автоматичного розміщення та вилучення товарів зі складських комірок. Основним виконавчим елементом цієї підсистеми є обладнання штабелювання, яке здійснює завантаження, розвантаження та переміщення вантажів у межах складської зони.

Таким чином, представлена структура демонструє взаємодію основних компонентів автоматизованого складу. Контролер координує роботу всіх підсистем, конвеєри забезпечують транспортування вантажів, система палетизації формує вантажні одиниці, а система складування виконує операції з розміщення та зберігання товарів. Така організація дозволяє підвищити швидкість обробки вантажів, зменшити вплив людського фактора та забезпечити ефективне функціонування складського комплексу.

На рисунку 2.4 представлено структурну схему системи автоматизованого керування палетизацією, яка є одним із ключових елементів автоматизованого складського комплексу. Відповідно до дослідження, система палетизації забезпечує автоматичне формування вантажних одиниць шляхом укладання продукції на піддони перед її транспортуванням до зони зберігання. Основним завданням системи є підвищення швидкості обробки вантажів, зменшення участі людини у виробничому процесі та забезпечення стабільної роботи складського обладнання.

Центральним елементом схеми є контролер, який виконує функції координації та керування всіма компонентами системи. Контролер отримує інформацію від датчиків та виконавчих механізмів, аналізує поточний стан процесу палетизації та формує керуючі команди для обладнання. Саме через контролер здійснюється взаємодія між підсистемами контролю, транспортування та укладання продукції.

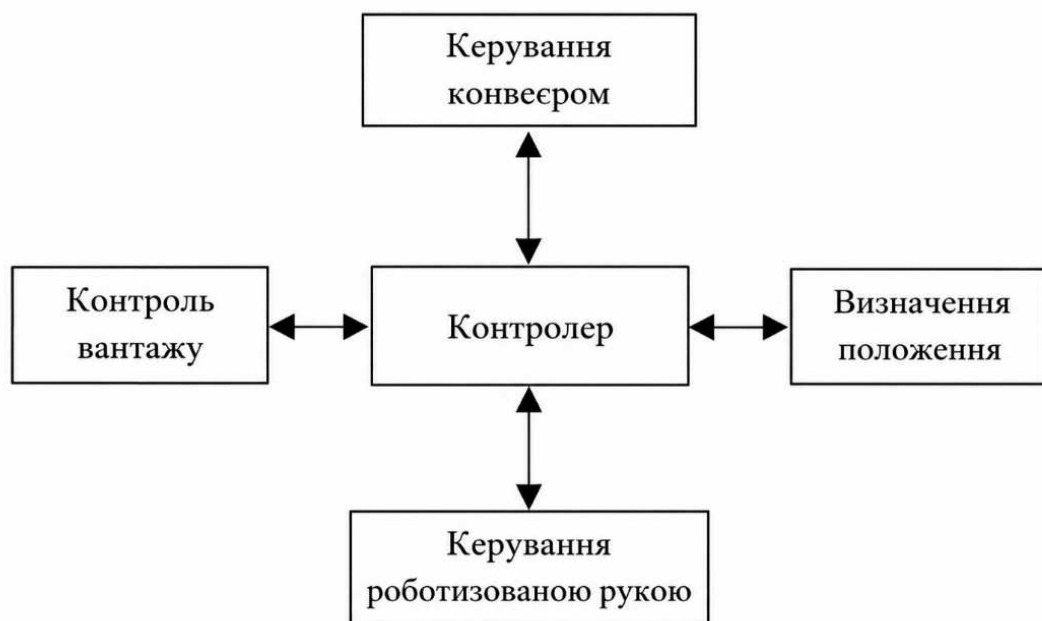


Рисунок 2.4 Структурна блок-схема системи автоматичного керування палетизацією.

У верхній частині схеми розташований блок керування конвеєром. Його призначення полягає в управлінні роботою конвеєрної лінії, яка транспортує

продукцію до зони палетизації. Контролер передає команди на запуск, зупинку або зміну режимів роботи конвеєра, а також отримує інформацію про стан транспортної системи. Завдяки цьому забезпечується безперервне та синхронізоване переміщення вантажів між виробничими ділянками.

Ліворуч від контролера знаходиться блок контролю вантажу. Ця підсистема відповідає за перевірку продукції, яка надходить на палетизацію. Контроль може включати визначення наявності вантажу, перевірку його цілісності, габаритів, ваги або правильності маркування. Дані, отримані від засобів контролю, передаються до контролера для прийняття рішення щодо подальшого виконання технологічної операції. У разі виявлення невідповідності система може зупинити процес або перенаправити вантаж на додаткову перевірку.

Праворуч від контролера розміщено блок визначення положення. Його функція полягає у відстеженні просторового розташування вантажу під час транспортування та палетизації. Для цього можуть використовуватися датчики положення, фотоелектричні сенсори або системи машинного зору. Інформація про координати вантажу передається до контролера, що дозволяє точно визначати момент захоплення об'єкта та його подальшого розміщення на піддоні.

У нижній частині схеми знаходиться блок керування роботизованою рукою. Роботизований маніпулятор виконує безпосередні операції із захоплення, переміщення та укладання продукції на піддон. Контролер надсилає команди на виконання необхідних рухів, а також отримує інформацію про поточний стан маніпулятора. Завдяки автоматизованому керуванню забезпечується висока точність позиціонування та повторюваність операцій.

Усі блоки схеми з'єднані двосторонніми каналами обміну даними. Це означає, що між контролером та кожною підсистемою здійснюється не лише передача команд, але й постійний зворотний зв'язок щодо стану обладнання та виконання операцій. Такий принцип роботи дозволяє оперативно реагувати на

зміни виробничої ситуації, своєчасно виявляти помилки та підтримувати стабільне функціонування системи.

Отже, структурна схема демонструє принцип організації автоматизованої системи палетизації, у якій контролер виступає центральним координуючим елементом, а підсистеми контролю вантажу, визначення положення, керування конвеєром і роботизованою рукою забезпечують виконання всіх технологічних операцій з мінімальним втручанням людини. Така архітектура сприяє підвищенню продуктивності складського комплексу, покращенню точності обробки вантажів та зниженню експлуатаційних витрат.

Автоматизована система складу в основному призначена для керування переміщенням штабелера та забезпечення ефективного виконання операцій зі зберігання і вилучення вантажів. Правильне функціонування штабелера є одним із найважливіших елементів автоматизованого складського комплексу, оскільки саме від його роботи залежить швидкість обробки товарів, точність виконання операцій та загальна продуктивність системи.

На рисунку 2.5 представлено структурну блок-схему системи керування автоматизованим складом. Центральним елементом системи є контролер, який координує роботу всіх підсистем та забезпечує обмін інформацією між ними. Контролер отримує сигнали від датчиків, аналізує поточний стан обладнання та формує керуючі команди для виконавчих механізмів.



Рисунок 2.5 Структурна блок-схема системи керування автоматизованим складом

Ліворуч від контролера розташований блок контролю вантажу. Його основним завданням є перевірка наявності вантажу, визначення його характеристик та підтвердження готовності до виконання складських операцій. Отримані дані передаються до контролера, який приймає рішення щодо подальшого переміщення товару.

Праворуч знаходиться блок визначення положення, що відповідає за контроль координат вантажу та обладнання. За допомогою датчиків положення система визначає місцезнаходження штабелера, вантажу та комірок зберігання. Це дозволяє забезпечити точне позиціонування під час виконання операцій завантаження та розвантаження.

У нижній частині схеми розташований блок керування роботизованою рукою. Дана підсистема відповідає за виконання механічних операцій із захоплення, переміщення та розміщення вантажів. Контролер надсилає команди роботизованому механізму, який виконує необхідні дії відповідно до отриманих інструкцій.

Основним завданням системи керування штабелером є отримання операційних команд та визначення того, чи необхідно розмістити товар на зберігання або вилучити його зі складу. Для цього здійснюється керування вертикальним підйомом, горизонтальним переміщенням та роботою вил штабелера. Крім того, система контролює точність прибуття до необхідної комірки та перевіряє наявність товару в місці зберігання.

Двосторонній обмін даними між контролером і всіма підсистемами забезпечує постійний зворотний зв'язок та можливість оперативного реагування на зміни в роботі обладнання. Завдяки цьому підвищується точність виконання складських операцій, скорочується час обробки вантажів і покращується загальна ефективність функціонування автоматизованого складу.

Таким чином, представлена структура демонструє принцип організації системи керування автоматизованим складом, у якій контролер виступає центральною ланкою управління, а підсистеми контролю вантажу, визначення

положення та керування роботизованою рукою забезпечують виконання всіх технологічних операцій з мінімальним втручанням людини.

У цій дипломній роботі для розв'язання задачі оптимізації розподілу складського простору було розроблено вдосконалений алгоритм пошуку Tabu (Tabu Search). Псевдокод алгоритму наведено нижче.

Вхідні дані: функції для операцій надходження та відвантаження товарів.

Вихідні дані: цільова функція ефективності складського зберігання.

Batches now = seed.seed(C, X, Y, A)

Batches now = Batches now[1:]

if ratio C <= (batches now[-1]) <= C:

 batches.extend(batches now)

else:

 Orders left.extend(batches now[])

 del batches now[]

 batches.extend(batches now)

if ratio C <= orders item number() <=

 Batches.append()

if orders item number() < ratio

 Orders left.extend()

orders = orders left

if orders item number(orders) <=

 batches.append(orders)

Множина можливих рішень може збігатися з множиною сусідніх рішень або бути її підмножиною. Якщо множина можливих рішень є власною

підмножиною множини сусідніх рішень, алгоритм може не вибрати оптимальне рішення із всієї множини сусідніх варіантів. Проте такий підхід дозволяє суттєво скоротити час пошуку. Після виконання достатньої кількості ітерацій алгоритм все ще здатний знайти більш якісне рішення.

У випадку, коли серед вибраної множини можливих рішень відсутнє краще рішення, як початкове рішення для наступної ітерації обирається найкраще з гірших рішень, отриманих на поточному етапі пошуку.

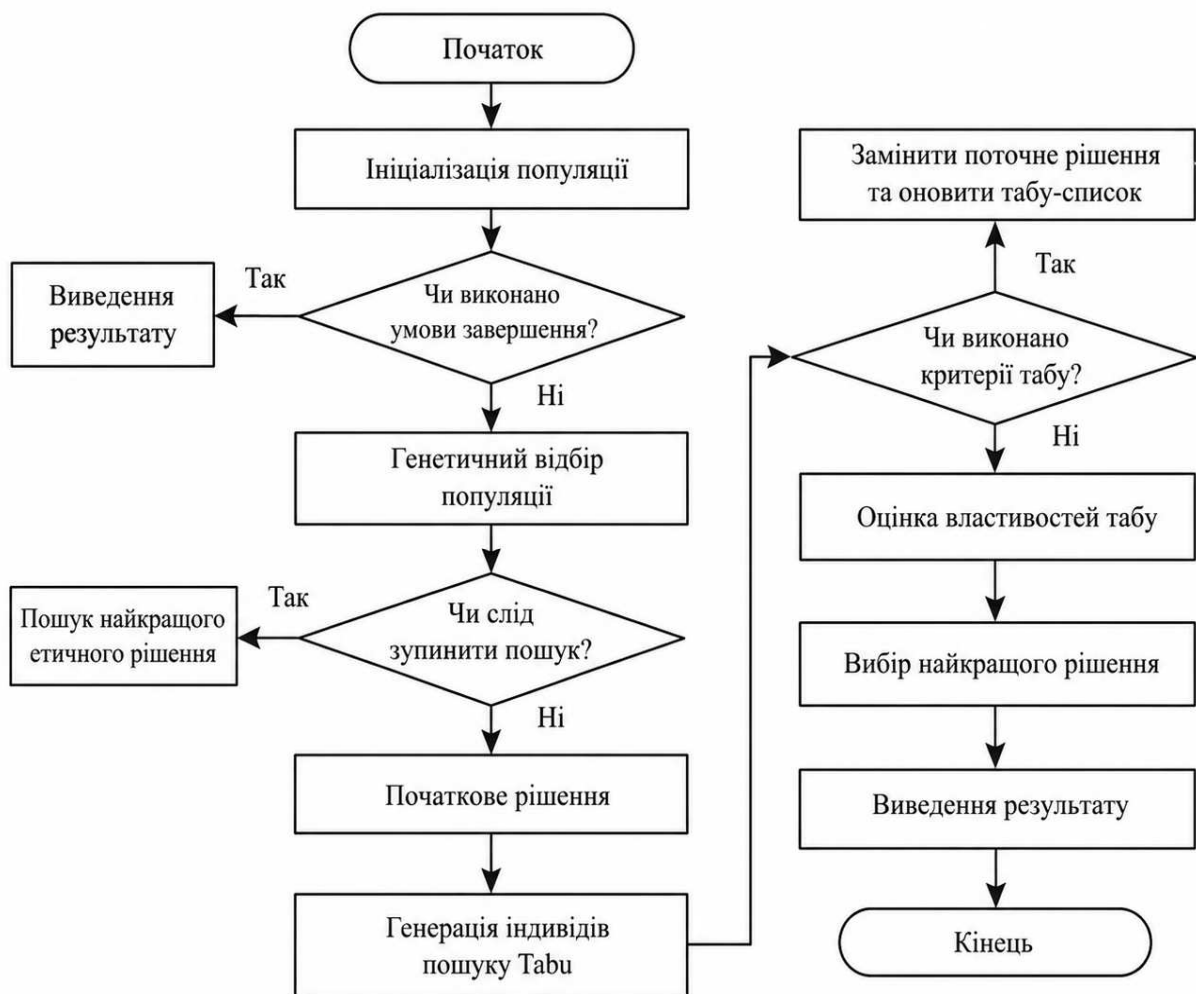
Вдосконалений алгоритм поєднує переваги двох підходів. З одного боку, він повністю зберігає здатність традиційного алгоритму Tabu Search виконувати глибокий локальний пошук. З іншого боку, використовує сильні сторони генетичного алгоритму, який забезпечує ефективний глобальний пошук простору рішень. Завдяки спільному використанню обидва алгоритми компенсують недоліки один одного та підвищують якість отриманих результатів.

Покрокова схема роботи вдосконаленого алгоритму Tabu Search наведена на рисунку 2.6.

Кількість товарів, які необхідно розподілити у складському просторі, визначається за допомогою алгоритму динамічного програмування. Аналіз показує, що основна складність і ключова особливість запропонованого алгоритму полягає у правильному формуванні цільової функції, тобто функції оцінювання штрафів. Саме від того, наскільки точно ця функція відображає реальні вимоги до роботи складу, залежить ефективність пошуку оптимального рішення та якість кінцевого розподілу товарів.

Розробляється математична модель оптимального розміщення товарів на складі. Формуються критерії оптимізації, серед яких мінімізація часу переміщення штабелера, скорочення відстаней транспортування вантажів та забезпечення рівномірного навантаження на стелажі. Описуються параметри розрахунку координат комірок, вагових характеристик продукції та показників ефективності роботи системи.

.



програмному коді, що значно спрощує процес модифікації та налаштування системи без внесення змін до вихідного коду програми (Wei та ін., 2019).

Нижче наведено фрагмент програмного коду модуля центру обробки даних:

```
XmlDocument doc = new XmlDocument();
doc.Load(System.AppDomain.CurrentDomain.BaseDirectory +
        configFullName);

Data[] dataArray = new Data[doc.LastChild.ChildNodes.Count];

for (int i = 0; i < dataArray.Length; i++)
{
    Data temp = new Data();

    foreach (XmlNode cloneChild in
        doc.LastChild.ChildNodes[i].ChildNodes)
    {
        switch (cloneChild.Name)
        {
            case "length_PLC":
                temp.length_PLC =
                    ushort.Parse(cloneChild.InnerText);
                break;
        }
    }

    dataArray[i] = temp;
}
```

Модуль читання та запису даних використовується для реалізації функцій встановлення з'єднання, читання даних, запису даних та розриву з'єднання. Спочатку викликається метод, який забезпечує підключення до апаратного пристрою ПЛК за допомогою IP-адреси та номера порту. У результаті створюється об'єкт сокета з постійним мережевим з'єднанням, який використовується для зв'язку з фізичним контролером. Усі подальші операції читання та запису даних виконуються через цей об'єкт з'єднання.

2.3 Алгоритм рішення та аналіз моделі оптимізації розподілу вантажів

Під час розрахунку схеми розподілу складальних деталей приймається припущення, що час запуску, розгону, уповільнення, гальмування та захоплення вантажу під час роботи штабелера дорівнює нулю. Іншими словами, вважається, що штабелер рухається з постійною швидкістю як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках [14].

Платформа приймання деталей на склад розташована на одному кінці стелажної системи. Для проведення розрахунків вводиться система координат, у якій за початок координат приймається положення вантажу, що знаходиться найближче до платформи складування. Вісь X відповідає напрямку довжини стелажа, вісь Y – напрямку висоти стелажа, а вісь Z – напрямку ширини стелажної конструкції.

У запропонованому алгоритмі пристосованість найкращого можливого рішення значно перевищує пристосованість історично найкращого рішення. Якщо в околі поточного рішення обирається певна кількість можливих рішень, таке рішення може бути прийняте алгоритмом незалежно від того, чи міститься воно у списку *Tabu* [18]. Такий підхід дозволяє розширити простір пошуку та підвищити ймовірність знаходження більш якісного розв'язку.

Якщо серед можливих рішень відсутній варіант зазначеного типу, поточне рішення замінюється іншим можливих рішенням, яке не входить до списку *Tabu*. Після цього відповідний перехід додається до списку *Tabu* [21]. Процес пошуку виконується багаторазово та повторюється ітераційно доти, доки не буде виконано умови критерію зупинки алгоритму.

Завдяки такому механізму вдосконалений алгоритм *Tabu Search* забезпечує ефективний баланс між дослідженням нових областей простору рішень і використанням уже знайдених перспективних напрямків пошуку, що сприяє підвищенню якості оптимізації розподілу місць зберігання на автоматизованому складі.

Координати схеми розподілу вантажів, отримані за допомогою традиційного алгоритму *Tabu Search* та вдосконаленого алгоритму *Tabu Search*, підставляються до цільової функції для обчислення її значення. Отримане значення використовується для оцінювання ефективності операцій приймання та відвантаження складальних деталей. Порівняння результатів дозволяє визначити, який із алгоритмів забезпечує більш раціональне розміщення вантажів і, відповідно, менші витрати часу на виконання складських операцій.

Ефективність зберігання складальних деталей оцінюється на основі отриманої схеми розподілу місць зберігання. Основною метою є забезпечення максимально раціонального використання складського простору при одночасному скороченні часу доступу до вантажів. Оптимальне розташування деталей дозволяє зменшити довжину маршрутів переміщення штабелера, підвищити швидкість виконання операцій складування та вилучення товарів, а також покращити загальну продуктивність автоматизованого складу.

Порівняння результатів, отриманих за допомогою традиційного та вдосконаленого алгоритмів *Tabu Search*, дає можливість оцінити вплив оптимізації на показники складської ефективності та визначити найбільш доцільний варіант організації простору зберігання (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 - Результати роботи традиційного алгоритму *Tabu Search* та вдосконаленого алгоритму *Tabu Search*

Цільова функція	Традиційний алгоритм Tabu Search	Вдосконалений алгоритм	Пояснення показника
Ефективність операцій приймання та відвантаження	2565,5 с	1727 с	Відображає продуктивність складських операцій. Чим менше значення, тим вища ефективність роботи складу.
Загальний еквівалентний центр ваги стелажної системи	(3,43; 2,86)	(2,39; 0,79)	Відображає показник стійкості стелажної системи. Чим ближче центр ваги до геометричного центру стелажа, тим рівномірніше розподілене навантаження та вища стійкість конструкції.

$$T_1(x, y) = 2 \times \sum_{m=1}^x \sum_{n=1}^y (D_{xy} \times t_{xy}), \quad (2.1)$$

$$D_{xy} = D'_{xy} \times Volum, \quad (2.2)$$

$$t_{xy} = \max \left\{ (x - 0.5) \times \frac{L}{v_x}, (y - 0.5) \times \frac{H}{v_y} \right\} \quad (2.3)$$

Результати, наведені в таблиці 2.1, демонструють переваги вдосконаленого алгоритму Tabu Search порівняно з традиційним підходом. За показником ефективності операцій приймання та відвантаження вантажів вдосконалений алгоритм забезпечив скорочення часу виконання складських операцій з 2565,5 с

до 1727 с. Це свідчить про більш раціональне розміщення деталей у складському просторі та скорочення маршрутів переміщення штабелера.

Другим важливим показником є загальний еквівалентний центр ваги стелажної системи. Для традиційного алгоритму його координати становлять (3,43; 2,86), тоді як для вдосконаленого алгоритму — (2,39; 0,79). Отримані результати свідчать про більш рівномірний розподіл вантажів по стелажах, що позитивно впливає на стійкість конструкції та безпеку експлуатації складського обладнання.

Таким чином, вдосконалений алгоритм *Tabu Search* не лише підвищує швидкість виконання складських операцій, але й забезпечує більш збалансований розподіл навантаження в межах складської системи. Це підтверджує доцільність використання комбінованого підходу, який поєднує переваги генетичного алгоритму та алгоритму *Tabu Search* для вирішення задач оптимізації розміщення вантажів.

Підставивши вагу деталей D_{xy} , швидкість руху штабелера $v_x = 1.2$ м/с та $v_y = 1$ м/с, а також координати розташування деталей, наведені в таблиці 2, у формули (3)–(5), було розраховано показник ефективності операцій приймання та відвантаження товарів. У результаті отримано значення $T = 1629$ с, що є меншим за встановлене граничне значення 8 годин, тобто система забезпечує необхідний рівень продуктивності складських операцій.

2.3.1 Стійкість стелажної системи

Для оцінювання стійкості стелажної конструкції використовується поняття еквівалентного центру ваги [6]. Координата еквівалентного центру ваги в горизонтальному напрямку (G_x) визначається за формулою 2.4:

$$G_x = \sum_{m=1}^x \sum_{n=1}^y D_{xy} \times (x - 0.5) \times L / \sum_{m=1}^x \sum_{n=1}^y D_{xy}, \quad (2.4)$$

де:

D_{xy} вага вантажу в комірці складу;

L довжина стелажа;

x, y координати розташування вантажу.

Координата еквівалентного центру ваги у вертикальному напрямку (G_y) визначається за формулою 2.5:

$$G_y = \sum_{m=1}^x \sum_{n=1}^y D_{xy} \times (x - 0.5) \times H / \sum_{m=1}^x \sum_{n=1}^y D_{xy}, \quad (2.5)$$

де H висота стелажної системи.

Після підстановки значень довжини стелажа $L = 4$ м, висоти стелажа $H = 6$ м, маси деталей та координат їх розміщення було отримано координати еквівалентного центру ваги:

- для традиційного алгоритму: $G = (3,31; 2,75)$;
- для вдосконаленого алгоритму: $G = (2,18; 0,92)$.

Далі було проведено порівняння значень цільових функцій, отриманих за допомогою традиційного алгоритму *Tabu Search* та вдосконаленого алгоритму *Tabu Search*. Результати порівняння наведено в таблиці 2.1.

Відповідно до отриманих значень цільових функцій, вдосконалений алгоритм *Tabu Search* демонструє кращі результати порівняно з традиційним алгоритмом. Час роботи штабелера є меншим, що свідчить про підвищення ефективності складських операцій. Крім того, загальний еквівалентний центр ваги стелажної системи розташований ближче до геометричного центру стелажа в горизонтальному напрямку та ближче до нижньої частини конструкції у вертикальному напрямку.

Таким чином, вдосконалений алгоритм забезпечує не лише скорочення часу обслуговування вантажів, а й більш рівномірний розподіл навантаження на стелажну систему. Це підвищує стійкість конструкції, покращує безпеку експлуатації та сприяє більш ефективному використанню складського простору.

Крім того, під час використання традиційного алгоритму *Tabu Search* для розв'язання задачі розподілу вантажів існує ймовірність передчасної збіжності алгоритму, коли отримані результати ще не є достатньо оптимальними. У

вдосконаленому алгоритмі *Tabu Search* застосовується гібридна стратегія, яка підвищує різноманітність популяції та розширює область пошуку рішень.

Для усунення впливу випадкових факторів під час роботи алгоритму традиційний алгоритм *Tabu Search* та вдосконалений алгоритм *Tabu Search* були незалежно запущені по п'ять разів у програмному середовищі MATLAB. Результати багаторазових ітерацій обох алгоритмів наведені на рисунку 2.7.

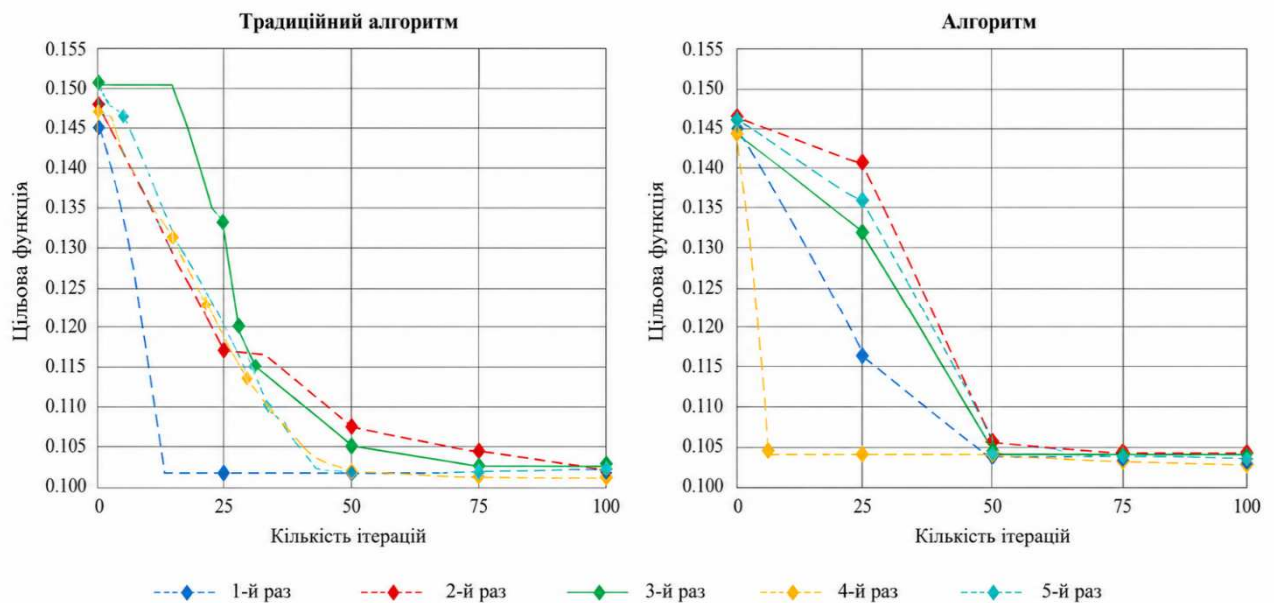


Рисунок 2.7 - Порівняльний графік тестування алгоритму *Tabu Search*

Коефіцієнт стабільності визначається як відношення кількості повторних запусків алгоритму, у яких було отримано однаковий кінцевий результат, до загальної кількості запусків алгоритму. Чим вищим є це відношення, тим стабільнішим вважається алгоритм. Коефіцієнт стабільності обчислюється за формулою:

$$sta = \frac{n}{N}, \quad (2.6)$$

де:

n кількість запусків, які дали однаковий кінцевий результат;

N загальна кількість запусків алгоритму.

Із тенденції зміни кривої значень пристосованості та кінцевих значень пристосованості на графіку ітерацій двох алгоритмів, наведеному на рисунку 2.7, можна побачити, що значення пристосованості для кожного з п'яти повторних запусків традиційного алгоритму *Tabu Search* відрізняються. Тому коефіцієнт стабільності цього алгоритму дорівнює 0.

Водночас результати чотирьох із п'яти запусків вдосконаленого алгоритму *Tabu Search* виявилися однаковими. У цьому випадку коефіцієнт стабільності становить 0,8, що значно перевищує показник традиційного алгоритму *Tabu Search*.

Отримані результати свідчать про те, що вдосконалений алгоритм має вищу стабільність та надійність під час розв'язання задачі оптимізації розподілу вантажів. Завдяки розширенню області пошуку та підвищенню різноманітності популяції він забезпечує більш послідовні результати та зменшує ризик передчасної збіжності до локального оптимуму.

Отже, у другому розділі було проведено моделювання роботи автоматизованого складу та досліджено принципи функціонування його основних підсистем. Розглянуто структуру автоматизованого складського комплексу, до складу якого входять стелажна система, конвеєрні лінії, штабелер, роботизовані маніпулятори, AGV-візки та система автоматичного сортування. Встановлено, що ефективність роботи складу значною мірою залежить від узгодженої взаємодії всіх компонентів та якості системи керування.

Проаналізовано архітектуру віртуального моделювання автоматизованого складу, яка базується на взаємодії користувача, програмованого логічного контролера, кеш-пам'яті, модуля моделювання та рушія візуалізації. Запропонована структура забезпечує відображення роботи складського обладнання у тривимірному середовищі та дозволяє виконувати тестування алгоритмів керування без використання реального обладнання.

У ході дослідження розглянуто структурні схеми системи палетизації та автоматизованого складу. Визначено функції основних підсистем, серед яких контроль вантажу, визначення положення, керування конвеєром та

роботизованими механізмами. Показано, що використання централізованого контролера забезпечує координацію роботи обладнання та підвищує надійність функціонування складської системи.

Для вирішення задачі оптимального розподілу вантажів було використано вдосконалений алгоритм *Tabu Search*, який поєднує механізми забороненого пошуку та генетичного алгоритму. Такий підхід дозволяє розширити область пошуку рішень, уникнути передчасної збіжності алгоритму та підвищити якість оптимізації. Було сформовано математичну модель розміщення товарів, яка враховує час переміщення штабелера, координати комірок зберігання та характеристики вантажів.

Результати моделювання показали перевагу вдосконаленого алгоритму над традиційним *Tabu Search*. Час виконання операцій приймання та відвантаження вантажів зменшився з 2565,5 с до 1727 с, що свідчить про підвищення продуктивності складської системи. Крім того, покращився показник еквівалентного центру ваги стелажної системи, що забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження та підвищує стійкість конструкції.

Отримані результати підтверджують ефективність використання вдосконаленого алгоритму *Tabu Search* для оптимізації роботи автоматизованого складу. Запропонований підхід дозволяє скоротити час виконання складських операцій, підвищити ефективність використання складського простору та створює основу для подальшої розробки програмного забезпечення автоматизації складських комплексів.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

3.1 Вибір середовища проектування

Розробка програмного забезпечення для автоматизації складських приміщень потребує використання сучасних програмних засобів, які забезпечують можливість створення математичних моделей, реалізації алгоритмів оптимізації, обробки даних та візуалізації результатів роботи системи. Вибір середовища проектування є важливим етапом розробки, оскільки саме від нього залежить швидкість створення програмного продукту, можливість інтеграції з обладнанням автоматизованого складу та ефективність проведення експериментальних досліджень.

Відповідно до дослідженої статті, для моделювання роботи автоматизованого складу використовувалася багаторівнева програмна архітектура, яка включає програмований логічний контролер (ПЛК), модуль обробки даних, тривимірне моделювання складського середовища та алгоритми оптимізації розміщення вантажів. Для реалізації такої системи необхідне програмне середовище, здатне підтримувати як математичні розрахунки, так і візуалізацію складських процесів у режимі реального часу.

Під час створення тривимірної моделі автоматизованого складу в дослідженні використовувалося програмне забезпечення 3ds Max, за допомогою якого були створені моделі стелажів, штабелерів, конвеєрних ліній, роботизованих маніпуляторів, піддонів та AGV-візків. Після створення тривимірних об'єктів вони імпортувалися до програмного рушія візуалізації, який забезпечував відображення роботи складської системи та анімацію переміщення обладнання. Такий підхід дозволяє максимально наблизити віртуальну модель до реальних умов експлуатації автоматизованого складу.

Для реалізації алгоритму оптимізації розподілу вантажів доцільно використовувати середовище MATLAB, яке широко застосовується для математичного моделювання, аналізу даних та дослідження алгоритмів оптимізації. У статті зазначено, що саме в середовищі MATLAB було реалізовано псевдокод удосконаленого алгоритму *Tabu Search* та проведено його тестування. За допомогою MATLAB були отримані результати оптимізації, побудовані графіки збіжності алгоритму та проведено порівняння традиційного й удосконаленого алгоритмів *Tabu Search*. Використання цього середовища дозволяє швидко реалізовувати складні математичні алгоритми та проводити їх експериментальне дослідження без необхідності створення великого обсягу низькорівневого програмного коду.

Важливою складовою системи є взаємодія з програмованим логічним контролером. У дослідженій архітектурі ПЛК виступає центральним елементом керування складським обладнанням та забезпечує обмін даними між віртуальною моделлю й реальними технологічними процесами. Для реалізації такого обміну використовуються мережеві протоколи передачі даних та механізми сокетного з'єднання. У статті наведено приклад програмного коду, який забезпечує підключення до ПЛК через IP-адресу та номер порту, а також виконує операції читання та запису даних через створене мережеве з'єднання.

Крім того, у системі використовується модуль центру обробки даних, який відповідає за зберігання конфігураційних параметрів та службової інформації. Для організації такого модуля доцільним є використання мови програмування C#, оскільки саме на ній реалізовано механізм роботи з XML-файлами конфігурації, наведений у статті. Використання XML дозволяє зберігати параметри системи у структурованому вигляді та спрощує процес зміни налаштувань без внесення змін до вихідного коду програми.

Отже, для реалізації запропонованої системи автоматизації складських приміщень доцільно використовувати комплекс програмних засобів, який включає 3ds Max для створення тривимірних моделей, MATLAB для реалізації алгоритмів оптимізації та проведення експериментальних досліджень, а також

C# для розробки програмних модулів обробки даних і взаємодії з програмованим логічним контролером. Поєднання зазначених технологій забезпечує можливість створення повноцінної системи моделювання та керування автоматизованим складом, що відповідає вимогам сучасних логістичних комплексів.

Під час вибору середовища проектування особливу увагу необхідно приділити можливості інтеграції різних програмних компонентів у межах єдиної інформаційної системи. Автоматизований склад є складним технічним об'єктом, у якому одночасно функціонують програмні модулі керування обладнанням, системи збору та обробки даних, алгоритми оптимізації, а також засоби тривимірної візуалізації. Тому програмна платформа повинна забезпечувати не лише реалізацію окремих функцій, а й підтримувати постійний обмін даними між усіма підсистемами. У дослідженій статті така взаємодія реалізується через використання програмованого логічного контролера, кеш-пам'яті, модуля моделювання та рушія візуалізації, які працюють як єдиний комплекс. Саме тому при виборі середовища проектування необхідно враховувати його сумісність із зовнішніми програмними бібліотеками, мережевими протоколами передачі даних та засобами моделювання технологічних процесів.

Важливим критерієм вибору середовища розробки є також можливість роботи з тривимірною графікою та анімацією. На відміну від традиційних інформаційних систем управління, програмне забезпечення автоматизованого складу повинно не лише виконувати обчислення, а й забезпечувати наочне представлення роботи обладнання. Візуалізація дозволяє оператору контролювати процеси транспортування, розміщення та вилучення вантажів, оцінювати правильність роботи алгоритмів і виявляти можливі помилки ще на етапі моделювання. Використання тривимірних моделей штабелерів, конвеєрів, роботизованих маніпуляторів та AGV-візків створює цифровий аналог реального складу, що дає можливість проводити випробування без використання дорогого фізичного обладнання. Завдяки цьому значно скорочуються витрати на впровадження системи та зменшується ризик виникнення помилок під час реальної експлуатації складського комплексу.

Окремої уваги заслуговує вибір середовища для реалізації алгоритмів оптимізації. У роботі основним інструментом оптимізації виступає вдосконалений алгоритм *Tabu Search*, який використовується для визначення оптимального розподілу товарів у складському просторі. Для реалізації такого алгоритму необхідне програмне середовище, яке підтримує роботу з матрицями, багатовимірними масивами, математичними функціями та засобами графічного аналізу результатів. MATLAB повністю відповідає зазначеним вимогам завдяки наявності вбудованих математичних бібліотек та інструментів для проведення чисельних експериментів. Крім того, середовище дозволяє швидко змінювати параметри алгоритму, аналізувати його поведінку за різних умов та будувати графіки збіжності, що є особливо важливим під час дослідження ефективності запропонованих методів оптимізації.

Ще одним фактором, який вплинув на вибір програмних засобів, є необхідність роботи з великим обсягом службових даних. Під час функціонування автоматизованого складу постійно генеруються дані про розташування вантажів, стан обладнання, маршрути переміщення штабелерів, результати роботи алгоритмів та параметри системи керування. Для ефективного зберігання таких даних використовується конфігураційний модуль на основі XML-файлів. Такий підхід забезпечує гнучкість налаштування програмного забезпечення та дозволяє змінювати параметри системи без перекомпіляції програмного коду. Використання технологій платформи .NET та мови програмування С# значно спрощує реалізацію подібних механізмів, оскільки вони містять готові інструменти для роботи з XML-документами, мережевими з'єднаннями та потоками даних.

Крім технічних характеристик, важливим критерієм вибору середовища проектування є його поширеність у промислових системах автоматизації. MATLAB, С# та програмовані логічні контролери широко використовуються у виробничих підприємствах, логістичних центрах та автоматизованих складських комплексах. Це забезпечує можливість подальшого розвитку програмного продукту, інтеграції з існуючими системами керування та адаптації до реальних

виробничих умов. Використання поширених програмних платформ також спрощує процес супроводу та модернізації системи в майбутньому, оскільки для них існує велика кількість документації, бібліотек та готових програмних рішень.

Таким чином, аналіз функціональних вимог до автоматизованої складської системи показав, що найбільш доцільним є використання комплексного підходу до вибору середовища проектування. Поєднання засобів тривимірного моделювання, математичного аналізу та програмної розробки дозволяє створити ефективну систему автоматизації складських приміщень, яка забезпечує не лише візуалізацію логістичних процесів, але й оптимізацію розподілу вантажів, контроль роботи обладнання та підтримку прийняття управлінських рішень в умовах сучасного автоматизованого складу. У таблиці 3.1 приведено порівняння можливих середовищ розробки програмного забезпечення автоматизованого складу

Таблиця 3.1 – Порівняння можливих середовищ розробки програмного забезпечення автоматизованого складу

Технологія	Переваги	Недоліки
C# (.NET)	Висока швидкодія; зручна робота з мережевими протоколами та ПЛК; підтримка багатопотоковості; велика кількість бібліотек; інтеграція з Windows-системами	Переважає орієнтація на платформу Windows; вищі вимоги до ресурсів порівняно з Python
Python	Простий синтаксис; велика кількість бібліотек для аналізу даних та штучного інтелекту; швидка розробка прототипів	Нижча швидкодія; складніша інтеграція з промисловим обладнанням реального часу

Продовження таблиці 3.1

Технологія	Переваги	Недоліки
Java	Портативність між платформами; висока надійність; підтримка багатопотоковості	Більш складна розробка графічних інтерфейсів; значний обсяг програмного коду
MATLAB	Потужні математичні бібліотеки; зручна реалізація алгоритмів оптимізації; вбудовані засоби візуалізації	Комерційне програмне забезпечення; менш придатний для створення повноцінних промислових систем
C++	Максимальна продуктивність; можливість роботи з обладнанням на низькому рівні	Висока складність розробки та супроводу; більший час створення програмного забезпечення

Проведений аналіз показав, що для реалізації програмного забезпечення автоматизованого складу найбільш доцільним є використання мови програмування C# та платформи .NET. Основною причиною такого вибору є необхідність забезпечення стабільної взаємодії між програмними модулями, системою візуалізації та програмованим логічним контролером. На відміну від MATLAB, який переважно використовується для математичного моделювання та дослідження алгоритмів, C# дозволяє створювати повноцінні програмні системи промислового рівня з графічним інтерфейсом користувача, підтримкою мережових з'єднань та засобами обробки даних у режимі реального часу.

Додатковою перевагою C# є наявність розвинених бібліотек для роботи з XML-файлами конфігурації, базами даних, сокетними з'єднаннями та мережевими протоколами, які використовуються для взаємодії з ПЛК. Саме такі механізми застосовуються в дослідженій системі під час обміну даними між контролером, кеш-пам'яттю та модулем візуалізації. Використання технології .NET також забезпечує підтримку об'єктно-орієнтованого програмування, що значно спрощує побудову модульної архітектури програмного забезпечення та його подальшу модернізацію [1].

Для реалізації та тестування вдосконаленого алгоритму Tabu Search було обрано середовище MATLAB [13]. Дане середовище забезпечує ефективну роботу з математичними моделями, дозволяє швидко реалізовувати алгоритми оптимізації та виконувати численні експерименти з різними параметрами системи. Завдяки вбудованим засобам побудови графіків MATLAB значно спрощує аналіз збіжності алгоритму та оцінювання його ефективності.

Таким чином, для розробки запропонованої системи використовується комбінований підхід: С# застосовується для створення основного програмного забезпечення автоматизованого складу та взаємодії з обладнанням, а MATLAB – для реалізації, тестування та дослідження алгоритму оптимізації розподілу вантажів. Таке поєднання дозволяє максимально використати переваги кожного програмного середовища та забезпечити високу ефективність функціонування розробленої системи.

Отже, для розробки програмного забезпечення автоматизованого складу було обрано мову програмування С# та платформу .NET як основні засоби реалізації програмної частини системи. Для моделювання та дослідження алгоритму оптимізації використовується середовище MATLAB, а для створення тривимірних моделей складського комплексу – засоби 3D-моделювання. Обране середовище проектування забезпечує необхідну функціональність, продуктивність та можливість подальшого розвитку системи автоматизації складських процесів.

3.2 Реалізація запропонованого підходу

Після вибору програмних засобів та технологій розробки наступним етапом стало проектування архітектури програмної системи автоматизованого складу. Основною метою розробки є створення програмного забезпечення, яке забезпечує автоматизацію процесів приймання, зберігання та відвантаження товарів, а також оптимізацію використання складського простору за допомогою вдосконаленого алгоритму *Tabu Search*.

					ДП.МТІР.9702474.00.00.00.000 ПЗ	50

```

graph TD
    Start(( )) --> A[Надходження товару]
    A --> B[Ідентифікація товару  
(штрихкод / RFID)]
    B --> C[Передача даних до ПЛК]
    C --> D[Запис параметрів у кеш  
та центр обробки даних]
    D --> E[Запуск алгоритму  
Tabu Search]
    E --> F[Формування множини  
кандидатних рішень]
    F --> G{Рішення  
покрщує  
цільову  
функцію?}
    G -- Так --> H[Визначення оптимальної  
комірки зберігання]
    G -- Ні --> I[Генерація нового  
сусіднього  
рішення]
    I --> F
    H --> J[Передача координат  
штабелеру]
    J --> K[Переміщення вантажу  
конвеєром]
    K --> L[Захоплення вантажу  
штабелером]
    L --> M[Розміщення у вибраній  
комірці]
    M --> N[Оновлення бази даних  
та 3D-моделі складу]
    N --> End((( )))
  
```

					ДП.МТИР.9702474.00.00.00.000 ПЗ	51

Запропонована програмна система складається з декількох основних компонентів: модуля користувацького інтерфейсу, модуля керування складськими операціями, модуля оптимізації розміщення вантажів, модуля взаємодії з обладнанням та модуля зберігання даних. Кожен із зазначених компонентів виконує власні функції та взаємодіє з іншими підсистемами через визначені програмні інтерфейси.

Модуль користувацького інтерфейсу забезпечує взаємодію оператора із системою. За його допомогою користувач може здійснювати авторизацію, переглядати інформацію про складські запаси, запускати процедури оптимізації, контролювати роботу обладнання та отримувати звіти про результати роботи системи. Інтерфейс виступає центральною точкою доступу до функціональних можливостей програмного забезпечення та забезпечує зручне керування всіма складськими процесами.

Модуль керування складськими операціями відповідає за координацію процесів приймання, переміщення та відвантаження товарів. Саме цей компонент формує завдання для складського обладнання, контролює їх виконання та забезпечує обмін інформацією між усіма підсистемами. У разі надходження нового вантажу модуль ініціює процес його реєстрації, після чого передає необхідні дані до модуля оптимізації для визначення найбільш доцільного місця зберігання.

Ключовим елементом розробленої системи є модуль оптимізації розподілу вантажів, у якому реалізовано вдосконалений алгоритм Tabu Search. Його основним завданням є визначення оптимальних координат розміщення товарів у межах складського простору з урахуванням часу переміщення штабелера, завантаженості стелажів та показників стійкості складської конструкції. Використання алгоритму дозволяє мінімізувати час виконання складських операцій та забезпечити більш раціональне використання доступного простору.

Для забезпечення взаємодії програмного забезпечення з фізичним обладнанням використовується модуль керування обладнанням. Даний компонент забезпечує обмін даними з програмованим логічним контролером,

Окремим компонентом архітектури є модуль зберігання даних. Він використовується для збереження інформації про товари, координати їх розташування, параметри складського обладнання та результати роботи алгоритму оптимізації. Для налаштування системи використовуються конфігураційні XML-файли, які дозволяють змінювати параметри роботи програмного забезпечення без внесення змін до вихідного коду. Такий підхід підвищує гнучкість системи та спрощує процес її адаптації до різних умов експлуатації. Загальна структура взаємодії між компонентами програмної системи представлена на UML-діаграмі компонентів (рисунок 3.2).

«component» User Interface (Інтерфейс користувача)

- Авторизація
- Перегляд складу
- Керування операціями
- Візуалізація 3D
- Перегляд звітів

«component» Control Module (Модуль керування)

- Обробка запитів користувача
- Координація процесів
- Управління операціями
- Взаємодія з іншими модулями

«component» Tabu Search Module (Модуль оптимізації)

- Генерація рішень
- Оцінка цільової функції
- Список табу
- Пошук оптимального розміщення

«component» Visualization Module (Модуль візуалізації 3D)

- 3D модель складу
- Візуалізація обладнання
- Анімація процесів
- Моніторинг стану системи

«component» Database Module (Модуль даних)

- Зберігання даних про товари
- Зберігання координат
- Зберігання конфігурацій
- Логі та історія операцій

«component» Configuration Module (Модуль конфігурації)

- Читання XML конфігурацій
- Параметри системи
- Налаштування обладнання
- Управління користувачами

«component» PLC Communication Module (Модуль взаємодії з ПЛК)

- Обмін даними з ПЛК
- Відправка команд
- Читання станів
- Обробка відповідей

«component» Warehouse Equipment (Складське обладнання)

- Штабелер
- Конвеєри
- Датчики
- Виконавчі механізми

Умовні позначення

- – компонент
- – інтерфейс
- – взаємодія (використання)
- - - – залежність (використання)

ДП.МТИР.9702474.00.00.00.000 ПЗ

Діаграма відображає основні програмні модулі та зв'язки між ними, що дозволяє наочно продемонструвати архітектуру розробленого програмного забезпечення та принципи його функціонування.

Побудована архітектура програмної системи забезпечує розподіл функціональних обов'язків між окремими компонентами та дозволяє реалізувати принцип багаторівневої обробки даних. Кожен компонент виконує визначений набір функцій та взаємодіє з іншими модулями через стандартизовані програмні інтерфейси. Такий підхід забезпечує гнучкість системи та спрощує її подальшу модернізацію.

Центральне місце в архітектурі займає модуль керування (Control Module). Даний компонент відповідає за координацію роботи всіх підсистем та виконує роль посередника між користувачем, алгоритмом оптимізації, базою даних і складським обладнанням. Після надходження запиту від користувача модуль керування аналізує отримані дані, визначає необхідну операцію та передає відповідні команди до інших компонентів системи. Крім того, саме цей модуль контролює послідовність виконання складських операцій та забезпечує синхронізацію роботи обладнання.

Модуль оптимізації *Tabu Search Module* реалізує запропонований у роботі алгоритм оптимізації розподілу вантажів. Основною функцією модуля є пошук оптимальних координат розміщення товарів у межах складського простору. Для цього використовується вдосконалений алгоритм *Tabu Search*, який дозволяє мінімізувати час переміщення штабелера та підвищити ефективність використання складських комірок. У процесі роботи модуль генерує множину можливих рішень, оцінює їх за допомогою цільової функції та формує оптимальний варіант розміщення товарів.

Для зберігання інформації використовується модуль бази даних (*Database Module*). У ньому містяться відомості про розташування товарів, параметри складського обладнання, результати роботи алгоритму оптимізації та історія виконаних операцій. Наявність централізованого сховища даних дозволяє забезпечити цілісність інформації та підтримувати актуальний стан цифрової

моделі складу. Під час кожної операції приймання або відвантаження вантажу база даних автоматично оновлюється, що забезпечує достовірність інформації про складські запаси.

Важливим елементом архітектури є модуль конфігурації (*Configuration Module*). Його основним завданням є зберігання та обробка параметрів системи. У даному модулі розташовуються XML-файли конфігурації, які містять налаштування обладнання, параметри алгоритмів та службову інформацію. Використання окремого конфігураційного модуля дозволяє змінювати параметри роботи програмного забезпечення без внесення змін до програмного коду, що значно спрощує адміністрування системи.

Взаємодія програмного забезпечення з фізичним обладнанням реалізується за допомогою модуля зв'язку з програмованим логічним контролером (*PLC Communication Module*). Даний компонент здійснює передачу команд до ПЛК та отримує інформацію про поточний стан складського обладнання. Обмін даними відбувається через мережеве з'єднання з використанням сокетної взаємодії. Завдяки цьому забезпечується оперативне виконання команд та своєчасне отримання інформації про результати їх виконання.

Модуль візуалізації (*Visualization Module*) забезпечує графічне представлення роботи автоматизованого складу. За його допомогою формується тривимірна модель складського комплексу, відображається переміщення штабелерів, конвеєрів та інших елементів обладнання. Візуалізація дозволяє оператору контролювати виконання складських операцій у режимі реального часу та оцінювати ефективність роботи системи. Крім того, використання тривимірної моделі значно спрощує аналіз результатів роботи алгоритму оптимізації.

Завершальним елементом архітектури є складське обладнання (*Warehouse Equipment*), яке включає штабелери, конвеєрні системи, датчики положення та виконавчі механізми. Саме це обладнання виконує фізичні операції з переміщення та розміщення вантажів відповідно до команд, сформованих

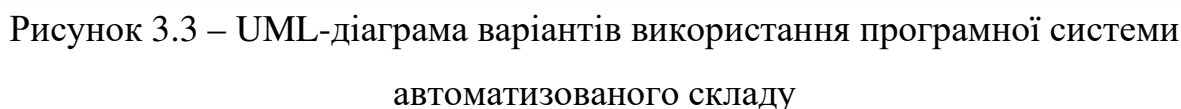
програмною системою. Узгоджена робота програмних і апаратних компонентів дозволяє забезпечити високий рівень автоматизації складських процесів та мінімізувати участь людини у виконанні рутинних операцій.

Таким чином, розроблена архітектура програмної системи забезпечує комплексну автоматизацію складських процесів, підтримує інтеграцію з обладнанням та створює основу для реалізації алгоритмів оптимізації розміщення вантажів. Модульний принцип побудови дозволяє масштабувати систему та адаптувати її до вимог складських комплексів різного призначення.

UML-діаграма варіантів використання, наведена на рисунку 3.3, демонструє функціональні можливості розробленої програмної системи автоматизованого складу та відображає основні сценарії взаємодії користувача із системою. В якості основного актора виступає оператор складу, який здійснює контроль складських операцій, взаємодіє з обладнанням та отримує інформацію про стан складського комплексу.

Робота із системою розпочинається з процедури авторизації. На цьому етапі здійснюється перевірка облікових даних користувача та надання доступу до відповідних функцій програмного забезпечення. Реалізація механізму авторизації дозволяє забезпечити контроль доступу до системи та підвищити рівень захисту інформації.

Після успішного входу користувач отримує можливість переглядати інформацію про складські запаси та поточний стан обладнання. Система надає актуальні відомості щодо розміщення товарів на стелажах, зайнятості комірок зберігання та виконання складських операцій. Уся інформація формується на основі даних, що зберігаються у базі даних та оновлюються в режимі реального часу.



Особливе значення для роботи автоматизованого складу має процедура оптимізації розміщення вантажів. Для її реалізації використовується вдосконалений алгоритм Tabu Search, який аналізує доступні комірки зберігання та формує оптимальний варіант розміщення товару. При цьому враховуються показники ефективності складських операцій, відстані переміщення штабелера

та параметри завантаження складської системи. Отримані результати передаються до модуля керування обладнанням для подальшого виконання відповідних операцій.

Для підвищення наочності роботи системи реалізовано модуль тривимірної візуалізації. Він дозволяє відображати структуру складського комплексу, місця розташування вантажів та переміщення обладнання. Завдяки використанню 3D-моделі оператор може контролювати виконання складських процесів та оцінювати результати оптимізації в інтерактивному режимі.

Окрему групу функцій становлять операції керування та моніторингу складського обладнання. За допомогою цих механізмів забезпечується передача команд до програмованого логічного контролера, а також отримання інформації про стан штабелерів, конвеєрів та інших виконавчих пристроїв. Це дозволяє своєчасно реагувати на можливі відхилення в роботі обладнання та підтримувати безперервність складських процесів.

Крім операцій з приймання та розміщення товарів, система підтримує процес відвантаження продукції. Після підтвердження операції виконується оновлення даних про складські залишки та коригування інформації про зайнятість комірок зберігання. Усі зміни автоматично фіксуються в базі даних.

Для аналізу результатів роботи передбачено функцію формування звітності. Система забезпечує автоматичне створення звітів щодо руху товарів, використання складського простору, продуктивності обладнання та ефективності роботи алгоритму оптимізації. Отримані дані можуть використовуватися для прийняття управлінських рішень та подальшого вдосконалення складських процесів.

Таким чином, наведена UML-діаграма варіантів використання відображає основні функціональні можливості розробленої системи та дозволяє формалізувати взаємодію користувача з програмним забезпеченням автоматизованого складу.

3.3 Реалізація алгоритму оптимального розміщення товарів

Перед запуском алгоритму було сформовано набір даних, що характеризує товари та структуру складського приміщення. Для кожної товарної позиції враховувалися її маса, частота звернення, координати місця зберігання та допустимі обмеження розміщення. Склад моделювався як набір комірок із фіксованими координатами, що дозволило представити задачу розміщення товарів у вигляді оптимізаційної задачі. На основі цих даних формувалося початкове рішення, яке надалі покращувалося алгоритмом *Tabu Search*. Значення параметрів, використаних у дослідженні, наведено в таблиці 3.2.

Псевдокод алгоритму було введено до програмного середовища MATLAB та виконано для розв'язання задачі розподілу місць зберігання. У результаті роботи алгоритму отримано послідовність сортування деталей. На основі попередньо визначеної матриці розташування були розраховані координати кожної деталі на стелажі відповідно до отриманої послідовності.

Одночасно за допомогою програмного забезпечення MATLAB було побудовано графік ітерацій традиційного алгоритму *Tabu Search*. Результати ітераційного процесу наведено на рисунку 3.4.

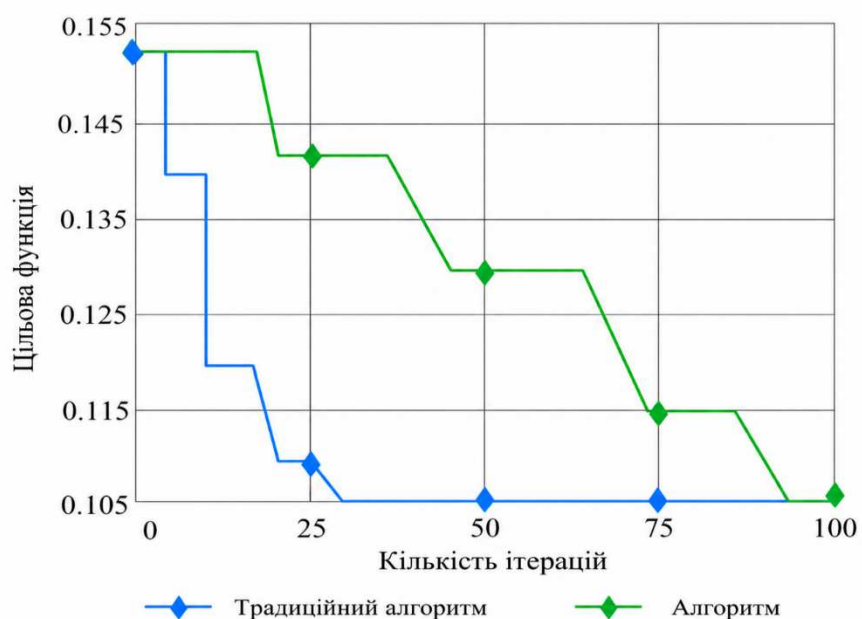


Рисунок 3.4 - Результати ітерацій алгоритму пошуку *Tabu*.

У таблиці 3.2 представлено основні параметри, значення та призначення в алгоритмі *Tabu Search*.

Таблиця 3.2 - Параметри, значення та призначення в алгоритмі *Tabu Search*

Параметр	Значення та призначення
$W_1 = 0,4; W_2 = 0,3; W_3 = 0,3$	Вагові коефіцієнти трьох цільових функцій оптимізації під час розподілу місць зберігання.
$T_{\max} = 100$	Максимальна кількість ітерацій алгоритму.
$L = 7$	Довжина списку Tabu (таблиці заборонених переходів).
$\Delta x = 1$	Допустимий нетабуйований крок переходу між рішеннями.
$T = t + 1$	Лічильник ітерацій алгоритму <i>Tabu Search</i> .
$n = 20$	Кількість деталей (товарних позицій), що підлягають розподілу.
$\alpha = 0,1$	Параметр нормалізації даних.
$NIND = 100$	Розмір популяції в генетичному алгоритмі.
$GGAP = 0,9$	Коефіцієнт розриву поколінь генетичного алгоритму.
$gen = 0$	Початковий лічильник ітерацій еволюції популяції.
$Gen = 0$	Лічильник збереження найкращої особини.
$Maxgen = 10$	Максимальна кількість поколінь, протягом яких зберігається найкраща особина.

Після застосування вдосконаленого алгоритму *Tabu Search*, у якому механізм забороненого пошуку використовується для покращення генетичної популяції рішень, продуктивність алгоритму суттєво зростає. Поєднання переваг генетичного алгоритму та алгоритму *Tabu Search* дозволило підвищити ефективність пошуку оптимального розв'язку та покращити якість отриманих результатів.

Значення цільової функції для вдосконаленого алгоритму становило 0,105, тоді як для традиційного алгоритму — 0,107, що підтверджує вищу ефективність запропонованого підходу. Оскільки менше значення цільової функції відповідає кращому результату оптимізації, це свідчить про перевагу запропонованого вдосконаленого алгоритму над класичним підходом.

Отримані результати підтверджують, що інтеграція генетичного пошуку з механізмом Tabu Search дозволяє ефективніше досліджувати простір можливих рішень, прискорює збіжність алгоритму та забезпечує знаходження більш якісних схем розподілу місць зберігання на складі. У таблиці 3.3 наведено приклад результатів роботи алгоритму оптимального розміщення товарів на складі. Для кожної товарної позиції вказано рівень частоти доступу до неї, початкове місце розташування та комірку, визначену алгоритмом після виконання оптимізації.

Аналіз результатів показує, що алгоритм здійснює перерозподіл товарів відповідно до інтенсивності їх використання. Товари з високою частотою доступу переміщуються до комірок, розташованих ближче до зон приймання та відвантаження продукції. Це дозволяє скоротити відстань переміщення штабелера та зменшити час виконання складських операцій. Товари із середньою частотою доступу займають проміжні позиції, тоді як продукція, до якої звертаються рідше, розміщується у віддалених комірках складу.

Такий підхід забезпечує більш раціональне використання складського простору та дозволяє рівномірно розподіляти навантаження між зонами зберігання. Крім того, оптимізоване розташування товарів сприяє зниженню витрат часу на пошук і транспортування продукції, що позитивно впливає на загальну продуктивність автоматизованої складської системи.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування алгоритму Tabu Search для розв'язання задачі оптимального розміщення товарів та демонструють можливість його використання в реальних автоматизованих складських комплексах.

Таблиця 3.3 - Результати оптимізації розміщення товарів на складі

Товар	Частота доступу	Комірка до оптимізації	Комірка після оптимізації
T1	Висока	A5	A1
T2	Середня	B4	B2
T3	Низька	A1	C5

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було розглянуто питання моделювання автоматизованої системи управління складським приміщенням та досліджено сучасні підходи до автоматизації складських процесів. Проведений аналіз показав, що впровадження автоматизованих систем управління складом є одним із найефективніших напрямів підвищення продуктивності логістичних комплексів, оскільки дозволяє скоротити час виконання операцій, підвищити точність обліку товарів та зменшити вплив людського фактора.

1. Проведено аналіз сучасних методів автоматизації складських приміщень. Розглянуто особливості функціонування складських комплексів, принципи роботи автоматизованих складських систем класу AS/RS, а також виконано порівняльний аналіз сучасних інформаційних систем управління складом WMS та WCS. Встановлено, що існуючі програмно-апаратні рішення забезпечують високий рівень автоматизації, проте потребують подальшого вдосконалення алгоритмів управління та оптимізації розміщення вантажів.

2. Досліджено структуру автоматизованого складу та виконано моделювання його основних компонентів. Розроблено архітектуру системи керування складським комплексом, яка включає підсистеми транспортування, складування та палетизації вантажів. Побудовано структурні схеми взаємодії між контролером, конвеєрними системами, роботизованими маніпуляторами, штабелерами та транспортними засобами AGV.

3. Запропоновано архітектуру, яка дозволяє забезпечити централізоване керування всіма складськими операціями та організувати обмін даними між окремими компонентами системи в режимі реального часу.

4. Особливу увагу приділено задачі оптимізації використання складського простору. Для розв'язання даної задачі запропоновано використання вдосконаленого алгоритму Tabu Search, який дозволяє знаходити ефективні варіанти розміщення товарів у складських комірках з урахуванням характеристик продукції, частоти доступу до неї та особливостей роботи складського обладнання. Використання алгоритму оптимізації сприяє

скороченню часу переміщення вантажів, підвищенню продуктивності штабелерів та більш раціональному використанню складських площ.

5. Виконано реалізацію запропонованого підходу та проведено експериментальне дослідження роботи автоматизованої системи. Для моделювання складського комплексу використано сучасні засоби тривимірного проектування та програмного моделювання, що дозволило створити віртуальну модель складу з можливістю відображення роботи обладнання в реальному часі. Реалізовано алгоритм оптимального розміщення товарів та проведено оцінювання ефективності його роботи.

6. За результатами моделювання встановлено, що використання автоматизованої системи управління складом дозволяє підвищити швидкість виконання логістичних операцій, покращити використання складського простору та забезпечити більш ефективне завантаження обладнання. Застосування алгоритму оптимізації дозволило зменшити непродуктивні переміщення штабелерів і транспортних засобів, що позитивно впливає на загальну продуктивність складського комплексу.

Таким чином, поставлена мета дипломної роботи досягнута. У процесі виконання роботи було розроблено модель автоматизованої системи управління складським приміщенням, досліджено принципи її функціонування, реалізовано алгоритм оптимального розміщення товарів та проведено оцінювання ефективності запропонованого підходу. Отримані результати підтверджують доцільність використання сучасних засобів автоматизації та методів оптимізації для підвищення ефективності роботи складських комплексів.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розроблених моделей та алгоритмів під час проектування автоматизованих логістичних центрів, складських комплексів і виробничих підприємств. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на впровадження технологій Інтернету речей, систем штучного інтелекту та цифрових двійників для створення інтелектуальних складських систем нового покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бублик В. В. Об'єктно-орієнтоване проектування програмних систем : навч. посіб. Київ : ІТ-Книга, 2018. 240 с.
2. Волошин О. Ф., Мащенко С. О. Моделі та методи прийняття рішень : підручник. Київ : ВПЦ "Київський університет", 2017. 431 с.
3. Глибовець М. М. Штучний інтелект : підручник для студентів ВНЗ. Київ : Вид. дім "КМ Академія", 2012. 424 с.
4. Григорак М. Ю. Інтелектуалізація логістичних систем : монографія. Київ : КНТЕУ, 2017. 260 с.
5. Гузенко В. С., Кириченко О. В. Сучасні тенденції автоматизації складських комплексів на базі WMS-систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32 (71), № 3. С. 45–51.
6. Ємець О. О., Роскладка О. В. Комбінаторна оптимізація на розміщеннях в логістичних задачах. *Управляющие системы и машины*. 2019. № 2. С. 55–64.
7. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій : підручник. Київ : Слово, 2016. 488 с.
8. Квасніков В. П., Ларін В. Ю. Автоматизація проектування складських систем із використанням об'єктно-орієнтованого моделювання. *Наукоємні технології*. 2021. № 3 (51). С. 278–285.
9. Кірсанова В. В. Оптимізація топології складського приміщення на основі моделі адресного зберігання. *Системні технології*. 2023. Т. 2, № 145. С. 34–42.
10. Криклівий Д. О. Аналіз архітектури та функціональних можливостей сучасних систем управління складом (WMS). *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2023. № 50. С. 112–118.
11. Кузьмичов А. І. Математичні методи оптимізації в логістиці : навч. посіб. Київ : НаУКМА, 2020. 192 с.

					ДП.МТІР.9702474.00.00.00.000 ПЗ	65

12. Пономарьова Ю. В. Логістика : навчальний посібник. Київ : Центр навчальної літератури, 2019. 288 с.
13. Ситник В. Ф. Імітаційне моделювання : навч. посіб. Київ : КНЕУ, 2015. 248 с.
14. Смирнов І. Г. Транспортно-складська логістика : навчальний посібник. Київ : КНУ ім. Тараса Шевченка, 2018. 315 с.
15. Ткаченко А. М., Котов А. О. Автоматизація складської діяльності як чинник підвищення ефективності логістичної системи підприємства. *Економічний вісник Донбасу*. 2020. № 2 (60). С. 143–149.
16. Швачич Г. Г., Мороз Б. І. Сучасні інформаційні технології проектування складних розподілених систем. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 23. С. 104–112.
17. Bartholdi J. J., Hackman S. T. Warehouse & Distribution Science. Release 0.98. Atlanta : Supply Chain and Logistics Institute, Georgia Institute of Technology, 2019. 322 p.
18. Cardona L. F., Rivera L., Martinez E. Simulation analysis of storage assignment policies in a container terminal. *International Journal of Logistics Systems and Management*. 2018. Vol. 30, No. 2. P. 185–201.
19. de Koster R., Le-Duc T., Roodbergen K. J. Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 182, No. 2. P. 481–501.
20. Faber N., de Koster R. B. M., Smidts A. Organizing warehouse management. *International Journal of Operations & Production Management*. 2013. Vol. 33, No. 9. P. 1230–1256.
21. Gharehgozli A., de Koster R., Schmidt Y. Storage assignment methods with market basket analysis in a zone-based warehouse. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2020. Vol. 143. 102111.
22. Gu J., Goetschalckx M., McGinnis L. F. Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 177, No. 1. P. 1–21.

23. He P., Xiaohong H. Research on Genetic Algorithm for Warehouse Storage Optimization. *Journal of Software*. 2014. Vol. 9, No. 4. P. 983–990.

24. Hompel M., Schmidt T. Warehouse Management: Automation and Organisation of Warehouse and Order Picking Systems. Berlin : Springer Science & Business Media, 2008. 376 p.

25. Rizzoli A. E., Fornara P. Simulation-based optimization of warehouse layout and storage assignment. *Computers & Industrial Engineering*. 2021. Vol. 155. 107182.

26. Roodbergen K. J., Vis I. F. A model for warehouse layout. *IIE Transactions*. 2006. Vol. 38, No. 10. P. 799–811.

27. Van den Berg J. P. Integral Warehouse Management: The Next Generation in Transparency, Speed and Production. Utrecht : Management Books 2000, 2012. 312 p.

28. Фіткайло М., Мороз Т. Архітектура автоматизованої складської системи на основі удосконаленого алгоритму TABU SEARCH. – Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКИТ-2026), Тернопіль, 2026. – 233-236с.