

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **Пояснювальна записка**

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)
Розроблення програмного модуля автоматизованого
керування замкненою ділянкою роботизованого
виробництва
(тема)

Виконав здобувач II року навчання,
групи КТРСм-23-2
Панков Артем Андрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальності 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і повна назва напрямку)

Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи
(назва)

Керівник доц. Демська Н.П.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАР _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка _____
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри _____
(підпис)

«__» _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Панкову Артему Андрійовичу _____
(шифр і назва)

1. Тема роботи: _____ Розроблення програмного модуля автоматизованого керування замкненою ділянкою роботизованого виробництва _____

Затверджена наказом університету від _____ 25.11.2024 №1239Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 23.01.2025р. _____

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Замкнена виробнича ділянка; 3.2 Автоматичний процес; 3.3 Роботизоване виробництво _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз сучасних систем автоматизованого управління замкненою виробничою ділянкою; 4.3 Обґрунтування вибору для дослідження системи; 4.4 Розробка структури системи; 4.5 Розробка математичної моделі системи; _____

4.6 Розрахунок системи на стійкість; 4.7 Обґрунтування вибору мови програмування та середовища розробки; 4.8 Розробка алгоритму роботи програмного модуля; 4.9 Програмна реалізація функцій автоматичного зважування, упаковки та маркування; 4.10 Програмна реалізація функцій сортування; 4.11 Розробка інтерфейсу для візуалізації процесу моделювання; 4.12 Проведення експериментальних досліджень та аналіз отриманих даних; 4.13 Висновки _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(*.ppt) формату А4 –15 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних систем автоматизованого управління замкненою виробничою ділянкою	16.09.2024-08.10.2024	виконано
2	Обґрунтування вибору для дослідження системи	09.10.2024-21.10.2024	виконано
3	Розробка структури системи	22.10.2024-01.11.2024	виконано
4	Розробка математичної моделі системи	02.11.2024-11.11.2024	виконано
5	Розрахунок системи на стійкість	12.11.2024-20.11.2024	виконано
6	Обґрунтування вибору мови програмування та середовища розробки	21.11.2024-25.11.2024	виконано
7	Розробка алгоритму роботи програмного модуля	26.11.2024-02.12.2024	виконано
8	Програмна реалізація функцій автоматичного зважування, упаковки та маркування	03.12.2024-08.12.2024	виконано
9	Програмна реалізація функцій сортування	09.12.2024-20.12.2024	виконано
10	Розробка інтерфейсу для візуалізації процесу моделювання	21.12.2024-24.12.2024	виконано
11	Проведення експериментальних досліджень та аналіз отриманих даних	25.12.2024-03.01.2025	виконано

Дата видачі завдання 2 вересня 2024р.

Здобувач 
(підпис)

Панков А. А.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Демська Н.П.
(прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію та підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав та не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

18.01.2025

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'А. А. Панков', written over a horizontal line.

Панков А. А.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 67 с., 8 табл., 14 рис., 3 дод., 21 джерело.

РУТНОН, РУСНАРМ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, АЛГОРИТМ, ВИРОБНИЧА ДІЛЯНКА, СОРТУВАННЯ, УПАКОВКА, ПРОДУКТИВНІСТЬ, ІНДУСТРІЯ 4.0.

Мета дослідження – підвищення ефективності керування замкненою ділянкою роботизованого виробництва за рахунок розроблення програмного модуля автоматизації.

Об’єкт дослідження – процес моделювання керування замкненою ділянкою роботизованого виробництва.

Предмет дослідження – методи, моделі та програмне забезпечення автоматизованого керування роботизованим виробництвом.

В кваліфікаційній роботі було проведено аналіз та класифікацію систем автоматизованого управління виробничою ділянкою, особливості управління замкненою виробничою ділянкою та ПЗ для моделювання управління замкненою виробничою ділянкою. Проведено обґрунтування вибору для дослідження системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції. Розроблено структуру та математичну модель системи управління ділянкою пакування та сортування продукції. Проведено розрахунок системи управління ділянкою пакування та сортування продукції на стійкість. Розроблено алгоритм роботи програмного модуля, програмно реалізовано функції автоматичного зважування, упаковки, маркування та сортування. Розроблено інтерфейс для візуалізації процесу моделювання. Проведено експериментальні дослідження та аналіз отриманих даних. Результати кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.4.

ABSTRACT

Explanatory note: 67 pages, 8 tables, 14 figures, 3 app, 21 sources.

PYTHON, PYCHARM, AUTOMATION, MODELING, ALGORITHM, PRODUCTION AREA, SORTING, PACKAGING, PRODUCTIVITY, INDUSTRY 4.0.

The purpose of the research is to increase the efficiency of controlling a closed section of robotic production by developing a software automation module.

The object of the research is the process of modeling the control of a closed section of robotic production.

The subject of the research is methods, models and software for automated control of robotic production.

The qualification work analyzed and classified automated production area management systems, features of closed production area management, and software for modeling closed production area management. The choice of an automated closed area management system for packaging and sorting products was justified for research. The structure and mathematical model of the packaging and sorting area management system were developed. The stability of the packaging and sorting area management system was calculated. The software module operation algorithm was developed, and the functions of automatic weighing, packaging, labeling, and sorting were implemented in software. An interface was developed for visualization of the modeling process. Experimental studies and analysis of the obtained data were conducted. The results of the qualification work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”, namely 9.4.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз сучасних систем автоматизованого управління замкненою виробничою ділянкою.....	12
1.1 Аналіз та класифікація систем автоматизованого управління виробничою ділянкою.....	12
1.2 Аналіз особливості управління замкненою виробничою ділянкою	13
1.3 Аналіз ПЗ для моделювання управління замкненою виробничою ділянкою	15
1.4 Постановка задач дослідження	18
2 Розробка математичної моделі системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції	20
2.1 Обґрунтування вибору для дослідження системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції.....	20
2.2 Розробка структури системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції	22
2.3 Розробка математичної моделі системи управління ділянкою пакування та сортування продукції.....	29
2.4 Розрахунок системи управління ділянкою пакування та сортування продукції на стійкість	35
2.5 Висновки до 2 розділу.....	39
3 Розроблення програмного модуля для моделювання управління роботою замкненої виробничої ділянки пакування та сортування продукції	41
3.1 Обґрунтування вибору мови програмування та середовища розробки	41
3.2 Розробка алгоритму роботи програмного модуля	42

3.3 Програмна реалізація функцій автоматичного зважування, упаковки та маркування	47
3.4 Програмна реалізація функцій сортування	48
3.5 Розробка інтерфейсу для візуалізації процесу моделювання	51
3.6 Висновки до 3 розділу	54
4 Експериментальні дослідження	55
4.1 Постановка мети та задач експерименту	55
4.2 Проведення експерименту та аналіз отриманих даних	56
4.3 Охорона праці	61
4.4 Висновки до 4 розділу	63
Висновки	65
Перелік джерел посилань	66
Додаток А Код програмного модуля автоматизованого управління замкненою виробничою ділянкою	69
Додаток Б Апробація результатів наукових досліджень	75
Додаток В Демонстраційний матеріал	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЗВД – замкненою виробничою ділянкою;

САУВД – системи автоматизованого управління виробничими ділянками;

DCS – розподілені системи управління;

PLC – програмовані логічні контролери;

WMS – системою управління складом.

ВСТУП

Актуальність дослідження зумовлена зростаючою потребою в автоматизації виробничих процесів у сучасних підприємствах, що займаються пакуванням і сортуванням продукції. Інтеграція автоматизованих систем управління дозволяє підвищити продуктивність, якість продукції та ефективність використання ресурсів, мінімізуючи вплив людського фактора. Особливо важливою є автоматизація замкнених виробничих ділянок, де необхідно забезпечити високу точність і швидкість виконання завдань, таких як зважування, упаковка, маркування та сортування. Таким чином, дослідження і розробка програмного модуля для автоматизованого керування такими ділянками відповідає сучасним викликам промисловості та сприяє впровадженню інноваційних рішень у виробничі процеси.

Також, актуальність підтверджується тенденцією до широкого впровадження технологій Індустрії 4.0, які передбачають інтеграцію інтелектуальних систем управління, моделювання та моніторингу у виробничі процеси. Розроблення структури, математичної моделі та програмного забезпечення для керування замкненою ділянкою дозволяє досягти високого рівня автоматизації, зменшити операційні витрати та оптимізувати логістичні процеси.

Мета дослідження – підвищення ефективності керування замкненою ділянкою роботизованого виробництва за рахунок розроблення програмного модуля автоматизації.

Об'єкт дослідження – процес моделювання керування замкненою ділянкою роботизованого виробництва.

Предмет дослідження – методи, моделі та програмне забезпечення автоматизованого керування роботизованим виробництвом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз та класифікацію систем автоматизованого управління виробничою ділянкою;
- провести аналіз особливості управління замкненою виробничою ділянкою;
- провести аналіз ПЗ для моделювання управління замкненою виробничою ділянкою;
- провести обґрунтування вибору для дослідження системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції;
- розробити структуру системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції;
- розробити математичну модель системи управління ділянкою пакування та сортування продукції;
- провести розрахунок системи управління ділянкою пакування та сортування продукції на стійкість;
- провести обґрунтування вибору мови програмування та середовища розробки;
- розробити алгоритм роботи програмного модуля;
- програмно реалізувати функції автоматичного зважування, упаковки та маркування;
- програмно реалізувати функції сортування;
- розробити інтерфейс для візуалізації процесу моделювання;
- провести експериментальні дослідження та аналіз отриманих даних.

Кваліфікаційна робота виконана згідно [1-3], а результати кваліфікаційної роботи отримали апробацію в науковій статті [4].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЗАМКНЕНОЮ ВИРОБНИЧОЮ ДІЛЯНКОЮ

1.1 Аналіз та класифікація систем автоматизованого управління виробничою ділянкою

Системи автоматизованого управління виробничими ділянками (САУВД) є ключовим компонентом сучасних виробничих процесів. Їх ефективність визначається здатністю забезпечувати високу продуктивність, точність і стабільність технологічних процесів. Аналіз і класифікація таких систем дозволяє виявити їх сильні та слабкі сторони, а також визначити оптимальні напрямки застосування для конкретних завдань [5].

Системи дискретного управління – це системи, які застосовуються для управління процесами, де технологічні операції виконуються у визначеній послідовності, приклади включають збирання, пакування та сортування. Системи безперервного управління призначені для управління процесами, які відбуваються безперервно, наприклад, контроль температури або потоку рідини.

Такі системи, як системи реального часу, забезпечують управління процесами, які потребують негайного реагування на зміни параметрів, наприклад, у роботі роботизованих маніпуляторів. Інтегровані системи управління об'єднують різні компоненти виробництва в єдину платформу для підвищення ефективності. Наступними, є розподілені системи управління (DCS), які використовуються для управління великими виробничими об'єктами, де дані збираються і обробляються локально.

Програмовані логічні контролери (PLC) застосовуються для автоматизації окремих технологічних операцій або невеликих виробничих ділянок. Інтелектуальні системи управління використовують штучний

інтелект для оптимізації процесів, наприклад, нейронні мережі можуть прогнозувати можливі збої у роботі. Гібридні системи поєднують властивості кількох типів систем для розв'язання комплексних завдань [6]. Представимо основні типи систем автоматизованого управління виробничою ділянкою, їх переваги та недоліки у вигляді порівняльної таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння переваг та недоліків основних типів систем автоматизованого управління виробничою ділянкою

Тип системи	Переваги	Недоліки
Дискретного управління	Висока точність, простота реалізації	Обмежена гнучкість
Безперервного управління	Висока стабільність	Висока вартість
Реального часу	Миттєва реакція	Висока складність розробки
Інтегровані системи	Масштабованість	Значні витрати на впровадження
Розподілені системи (DCS)	Підвищена надійність	Складність управління
Програмовані логічні контролери	Висока надійність	Обмежена масштабованість
Інтелектуальні системи	Адаптивність	Складність впровадження
Гібридні системи	Гнучкість	Висока вартість обслуговування

Проведений аналіз і класифікація систем автоматизованого управління виробничими ділянками дозволяють оптимізувати вибір та впровадження рішень залежно від специфічних потреб виробництва [7].

1.2 Аналіз особливості управління замкненою виробничою ділянкою

Управління замкненою виробничою ділянкою (ЗВД) має низку унікальних характеристик, які відрізняють її від інших типів виробничих систем. Головною особливістю є замкненість циклу, що передбачає

обмеженість вхідних та вихідних потоків ресурсів, а також необхідність забезпечення повної інтеграції усіх елементів ділянки [8].

Однією з ключових характеристик ЗВД є високий рівень автоматизації. Це обумовлено необхідністю зменшення впливу людського фактора на виробничі процеси, підвищення точності виконання операцій та забезпечення стабільності технологічного циклу. Автоматизація дозволяє забезпечити постійний моніторинг та корекцію параметрів виробництва.

Другим важливим аспектом є інтеграція обладнання та програмного забезпечення в єдину систему. Це дозволяє створити так званий "цифровий двійник" виробничої ділянки, який відображає всі процеси в реальному часі. Такий підхід сприяє покращенню управління, прогнозуванню несправностей та оптимізації використання ресурсів.

Замкнена виробнича ділянка потребує високого рівня надійності обладнання. Оскільки будь-яка несправність може призвести до зупинки всього циклу, важливо забезпечити регулярне обслуговування та впровадження системи діагностики в режимі реального часу. Це знижує ризики простоїв і підвищує ефективність роботи [9].

Ще однією особливістю є модульність систем управління. Модульна структура дозволяє легко адаптувати ділянку до змін у технологічному процесі або розширення функціоналу. Наприклад, можна додати нові елементи для автоматичного сортування продукції без значних змін у базовій системі.

Особливу увагу слід приділити питанням енергоефективності та безпеці. Замкнені виробничі ділянки часто працюють у режимі високого енергоспоживання, тому важливо оптимізувати енергетичні процеси. Це може включати впровадження енергоощадного обладнання або використання відновлюваних джерел енергії. Замкнена структура вимагає інтеграції систем безпеки, що забезпечують захист як персоналу, так і самого обладнання,

наприклад, використовуються автоматичні блокувальні механізми, датчики перегріву та системи відеоспостереження.

Екологічність є ще одним аспектом управління ЗВД, оскільки виробничі цикли мають обмежений вихід відходів, важливо забезпечити їхнє належне утилізування або переробку, що не лише знижує екологічний вплив, але й дозволяє повторно використовувати ресурси. Ще однією важливою характеристикою є адаптивність замкненої ділянки. Вона повинна мати здатність швидко адаптуватися до змін у виробничих вимогах, наприклад, змін у типах продукції або обсягах виробництва. Для цього використовуються системи штучного інтелекту та гнучкі алгоритми управління.

Однією з переваг ЗВД є можливість повної автоматизації складних процесів, таких як зважування, упаковка та маркування продукції, що значно підвищує швидкість і якість виконання операцій, зменшуючи витрати на ручну працю. Замкнена виробнича ділянка дозволяє створити умови для постійного вдосконалення технологічного процесу. Впровадження систем аналізу даних та прогнозування сприяє підвищенню продуктивності, мінімізації витрат та оптимізації використання ресурсів. Таким чином, ЗВД стає важливим інструментом підвищення конкурентоспроможності підприємства [10].

1.3 Аналіз ПЗ для моделювання управління замкненою виробничою ділянкою

Програмне забезпечення для моделювання управління замкненою виробничою ділянкою є важливим інструментом для оптимізації та тестування технологічних процесів. Його використання дозволяє знизити витрати на розробку та впровадження нових рішень, а також мінімізувати ризики, пов'язані з можливими помилками в реальному виробництві [11].

Перший ключовий етап використання ПЗ для моделювання ЗВД – це аналіз виробничого процесу. На цьому етапі збираються та систематизуються дані про всі елементи виробничої ділянки, включаючи обладнання, технологічні операції, вхідні та вихідні потоки. Другим етапом є створення моделі виробничої ділянки. Цей етап включає побудову структурної схеми, яка відображає взаємозв'язок між різними елементами системи. Наприклад, моделюється рух продукції, взаємодія між конвеєрами, роботами та сенсорами.

Наступний етап – це інтеграція математичних моделей. Математичні моделі дозволяють точно описати фізичні та технологічні процеси, що відбуваються на ділянці. Наприклад, моделі можуть враховувати динаміку руху роботів, швидкість обробки продукції та витрати енергії. Далі іде розробка алгоритмів управління, алгоритми забезпечують автоматичне керування обладнанням, реагування на зміни умов і оптимізацію процесів, наприклад, алгоритми можуть бути налаштовані для адаптації до різних типів продукції [12].

Наступний етап включає тестування та калібрування моделі. На цьому етапі проводиться перевірка моделі на відповідність реальним умовам. Виявляються можливі помилки, а також проводиться оптимізація параметрів для досягнення максимальної точності. Шостий етап – це візуалізація процесів. Важливо, щоб користувачі могли спостерігати за симуляцією в реальному часі, що дозволяє виявляти вузькі місця та оцінювати ефективність рішень. Для цього використовуються 2D або 3D моделі виробничої ділянки.

Особливу увагу слід приділити інтеграції з реальним обладнанням. ПЗ має підтримувати зв'язок з контролерами, датчиками та іншими пристроями, що використовуються на виробничій ділянці. Це дозволяє перенести результати моделювання в реальну систему.

Важливим етапом є аналіз даних, сучасне ПЗ повинно мати інструменти для збору та аналізу великих обсягів даних, що генеруються під час моделювання, що допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації процесів. Наступний етап – це адаптація до змінних умов. ПЗ повинно мати можливість швидко адаптувати моделі до змін у виробничих процесах, таких як нові типи продукції, зміна обсягів виробництва або оновлення обладнання [13].

Окремо варто виділити питання безпеки. ПЗ має забезпечувати імітацію різних аварійних ситуацій, що дозволяє перевірити надійність системи та підготувати персонал до непередбачуваних подій. Крім того, важливо враховувати масштабованість. Програмне забезпечення має підтримувати моделювання не тільки окремих ділянок, але й інтеграцію декількох замкнених ділянок в єдину систему.

Вимоги до ПЗ включають високий рівень точності моделювання. Модель повинна точно відображати всі аспекти реального виробництва, включаючи динамічні зміни параметрів і взаємодію між елементами. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс також є важливим. Користувачі повинні мати можливість швидко налаштовувати моделі, вносити зміни та аналізувати результати без глибоких технічних знань. Система має бути сумісною з іншими програмними продуктами. Це дозволяє інтегрувати її в існуючі інфраструктури підприємства та використовувати дані з різних джерел. Швидкодія є ще одним важливим критерієм. ПЗ повинно забезпечувати оперативну обробку великих обсягів даних і проводити моделювання в реальному часі без значних затримок. Надійність системи також відіграє ключову роль. Важливо, щоб ПЗ працювало стабільно навіть за умов високих навантажень або під час моделювання складних процесів.

Серед інших вимог можна виділити гнучкість та адаптивність. Програмне забезпечення має легко налаштовуватися для різних галузей промисловості та виробничих процесів. Можна зробити висновки, ПЗ для

моделювання управління замкненою виробничою ділянкою є потужним інструментом, що дозволяє оптимізувати процеси, підвищувати ефективність та забезпечувати надійність роботи виробничої системи [14].

1.4 Постановка задач дослідження

В ході проведеного у першому розділі аналізу, було виявлено, що тема дослідження є актуальною. Метою дослідження є підвищення ефективності керування замкненою ділянкою роботизованого виробництва за рахунок розроблення програмного модуля автоматизації. Об'єктом дослідження є процес моделювання керування замкненою ділянкою роботизованого виробництва. Предметом дослідження є методи, моделі та програмне забезпечення автоматизованого керування роботизованим виробництвом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести обґрунтування вибору для дослідження системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції;
- розробити структуру системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції;
- розробити математичну модель системи управління ділянкою пакування та сортування продукції;
- провести розрахунок системи управління ділянкою пакування та сортування продукції на стійкість;
- провести обґрунтування вибору мови програмування та середовища розробки;
- розробити алгоритм роботи програмного модуля;
- програмно реалізувати функції автоматичного зважування, упаковки та маркування;

- програмно реалізувати функції сортування;
- розробити інтерфейс для візуалізації процесу моделювання;
- провести експериментальні дослідження та аналіз отриманих даних.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЗАМКНЕНОЮ ДІЛЯНКОЮ ДЛЯ ПАКУВАННЯ ТА СОРТУВАННЯ ПРОДУКЦІЇ

2.1 Обґрунтування вибору для дослідження системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції

У сучасних умовах автоматизація виробничих процесів є ключовим напрямом розвитку промисловості, особливо в контексті індустрії 4.0. Одним із найбільш критичних етапів ланцюга виробництва є пакування та сортування продукції, які безпосередньо впливають на якість кінцевого продукту, його готовність до відправлення споживачу та ефективність логістики. Вибір дослідження системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції обґрунтований рядом факторів, пов'язаних із актуальністю, технологічною значущістю та перспективністю впровадження таких систем.

Зростання обсягів виробництва вимагає збільшення швидкості та якості обробки продукції на фінальних етапах. Ручне пакування та сортування вже не задовольняють сучасні вимоги через низьку продуктивність, високу ймовірність помилок і значні витрати на трудові ресурси. Автоматизація цих процесів дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи, зменшити виробничі витрати та мінімізувати людський фактор, що є особливо важливим у таких галузях, як харчова промисловість, фармацевтика, електроніка та інші.

Досліджувана система має замкнену структуру, що дозволяє інтегрувати всі етапи пакування та сортування в єдину лінію. До основних операцій відносяться:

- завантаження виробів на конвеєр, що забезпечує початкову автоматизацію процесу та зменшує затрати часу на ручну підготовку продукції;

- автоматичне вимірювання або зважування, що гарантує відповідність продукції заданим стандартам. Ця операція важлива для контролю якості й формування пакетів із заданими характеристиками;

- упаковка в тару (коробки, плівку тощо) здійснюється із залученням спеціалізованого обладнання, яке забезпечує герметичність, точність і естетичний вигляд готового продукту;

- маркування, що дозволяє ідентифікувати кожен одиницю продукції відповідно до вимог системи контролю якості та логістики;

- сортування та відправлення на склад, яке оптимізує внутрішньоскладські операції та підвищує швидкість відвантаження замовлень.

Кожна з цих операцій автоматизована за допомогою відповідного обладнання: конвеєрних ліній, роботизованих маніпуляторів, сканерів контролю якості та систем маркування. Такий підхід мінімізує ризики, пов'язані з помилками на кожному етапі, та забезпечує безперервність процесу.

Використання роботизованих маніпуляторів і сканерів дозволяє досягти високої швидкості роботи системи, що підвищує її продуктивність. Завдяки автоматизації часу, який раніше витрачався на ручне сортування й маркування, скорочується, а відповідно, зменшуються витрати на оплату праці. Додатково, автоматичний контроль якості запобігає виробничим втратам через випуск дефектної продукції, що позитивно впливає на рентабельність системи.

Запропонована система є гнучкою, тобто її можна адаптувати до змін у виробничих вимогах. Наприклад, використання роботизованих маніпуляторів із програмованими траєкторіями дозволяє швидко перебудувати систему для

роботи з різними типами продукції чи упаковки. Це робить систему універсальною та перспективною для впровадження в багатьох галузях.

Автоматичне маркування продукції полегшує ідентифікацію та відстеження на всіх етапах ланцюга поставок. Система також сприяє дотриманню стандартів якості завдяки автоматичному контролю на кожному етапі, що є важливим для підвищення довіри споживачів до продукції.

Дослідження математичних моделей, що описують роботу системи (наприклад, баланс часу між етапами, взаємодію маніпуляторів і конвеєра, оцінку продуктивності), дозволить підвищити ефективність роботи та знайти оптимальні режими її функціонування. Вивчення динаміки завантаження конвеєра, руху виробів та роботи маніпуляторів допоможе розробити адаптивні алгоритми керування, що реагують на зміни у виробничих умовах.

Скорочення енергоспоживання та відходів при автоматизованій упаковці також є вагомим аргументом на користь впровадження таких систем. Система може бути налаштована для оптимального використання матеріалів, що знижує негативний вплив на довкілля.

Вибір дослідження автоматизованої системи управління ділянкою пакування та сортування продукції є логічним і виправданим з точки зору сучасних вимог промисловості. Така система дозволяє підвищити продуктивність, оптимізувати витрати, забезпечити високу якість продукції та її відповідність сучасним стандартам. Автоматизація цих процесів є важливим кроком у розвитку ефективних і стійких виробничих ліній, що відповідають концепції індустрії 4.0 [15].

2.2 Розробка структури системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції

Розробка структури системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції є важливим завданням,

оскільки така система дозволяє забезпечити високу ефективність та якість виробничого процесу. Автоматизація цієї ділянки є невід'ємною складовою сучасних виробничих систем, які працюють у межах концепції індустрії 4.0. Основною метою є інтеграція всіх етапів – від завантаження продукції до її сортування та відправлення – в єдину замкнену систему, яка мінімізує участь людини та оптимізує використання ресурсів. Така структура повинна забезпечувати безперервність та узгодженість роботи всіх компонентів: конвеєрів, роботизованих маніпуляторів, систем контролю якості та маркування. Це дозволить досягти не тільки високої продуктивності, але й забезпечити універсальність системи для роботи з різними видами продукції. Особливу увагу слід приділити розподілу функцій між елементами системи, створенню адаптивних алгоритмів керування та забезпеченню гнучкості для адаптації до змін у виробничих умовах. Також важливо врахувати можливість масштабування системи для обробки великих обсягів продукції, що забезпечить її довговічність і економічну вигідність. Структура повинна включати засоби для моніторингу та діагностики всіх процесів у реальному часі, що дозволить оперативно виявляти відхилення й оптимізувати роботу. Загалом, розробка такої системи є логічним кроком у напрямку створення сучасних автоматизованих виробництв, орієнтованих на високу продуктивність, надійність і екологічність.

В рамках даної роботи пропонується розробити та дослідити процес роботи замкненої ділянки для пакування продукції. На вході такої системи подаються готові вироби та пакувальний матеріал. Ділянка пакування та сортування продукції складається з наступних операцій: завантаження виробів на конвеєр; автоматичне зважування; упаковка в тару; маркування; сортування та відправлення на склад. На виході такої системи: упаковка продукції. Загальна структурна схема замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції представлена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема замкненої ділянки для пакування та сортування продукції

Базуючись на розробленій загальній структурній схемі замкненої ділянки для пакування та сортування продукції, обрано наступні моделі обладнання, які представлено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Обрані моделі обладнання з обґрунтуванням вибору та описом особливостей

Модель	Тип	Особливості	Обґрунтування вибору
1	2	3	4
Interroll Belt Conveyor System	Стрічковий конвеєр із модульною стрічкою	<ul style="list-style-type: none"> - висока адаптивність до різних типів виробів; - енергоефективний привід, що знижує витрати енергії; - можливість інтеграції з сенсорами та PLC-контролерами 	Система підходить для транспортування різноманітних виробів завдяки міцній стрічці, а також підтримує інтеграцію з вимірювальними системами та роботами

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
FlexLoader FP 200 (ABB)	Роботизований завантажувач	<ul style="list-style-type: none"> - використовує камери та датчики для точного позиціонування виробів; - підтримує широкий спектр форм і розмірів продукції; - простота інтеграції в автоматизовану лінію 	<p>Висока швидкість і точність роботи робота дозволяють автоматизувати процес завантаження та уникнути затримок</p>
Mettler Toledo C33 PlusLine	Система динамічного зважування (Checkweigher)	<ul style="list-style-type: none"> - зважування у русі без зупинки конвеєра; - точність до 0,1 г; - вбудована система відбраковування 	<p>Система забезпечує контроль якості зважування на високій швидкості, що критично для продуктивності лінії</p>
ULMA TFS 600 (Thermoformer)	Термоформувальна пакувальна машина	<ul style="list-style-type: none"> - вакуумна упаковка для герметизації; - підтримує різні типи пакувальних матеріалів (плівка, коробки); - продуктивність до 30 упаковок/хв 	<p>Підтримка вакуумного та герметичного пакування підвищує термін зберігання продукції</p>
Videojet 1860	Струменевий індустріальний принтер	<ul style="list-style-type: none"> - друк штрих-кодів, QR-кодів та тексту; - робота на високих швидкостях конвеєра; - підтримка змінних даних у реальному часі 	<p>Надійність і швидкість роботи роблять цей принтер оптимальним для маркування на конвеєрі</p>

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
ABB IRB 390 FlexPacker	Робот для сортування та укладання	<ul style="list-style-type: none"> - робот може обробляти до 120 циклів за хвилину; - висока гнучкість для роботи з різними розмірами продукції; - простота інтеграції в існуючу лінію 	Гнучкість і швидкість роботи дозволяють адаптувати систему до змін у виробництві
MiR100 (AGV)	Автономний транспортний робот	<ul style="list-style-type: none"> - автономне переміщення продукції на склад; - легке налаштування маршрутів; - інтеграція з системою управління складом (WMS) 	Автоматизація доставки скорочує ручну працю і зменшує ризики пошкодження продукції

Загальний вигляд обраного обладнання для замкненої ділянки для пакування та сортування продукції, представлено на рисунку 2.2, а в таблиці 2.2 приведено технічні характеристики обраного обладнання для системи управління ділянкою пакування та сортування продукції.



а)



б)



в)



г)



д)



е)



е)

а) Interroll Belt Conveyor System; б) FlexLoader FP 200 (ABB);
 в) ULMA TFS 600 (Thermoformer); г) Mettler Toledo C33 PlusLine;
 д) Videojet 1860; е) ABB IRB 390 FlexPacker; е) MiR100 (AGV)

Рисунок 2.2 – Загальний вигляд обраного обладнання для системи управління ділянкою пакування та сортування продукції

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики обраного обладнання для системи управління ділянкою пакування та сортування продукції

Обладнання	Основні характеристики
1	2
Interroll Belt Conveyor System	<ul style="list-style-type: none"> - тип конвеєра: стрічковий; - швидкість транспортування: до 2 м/с; - максимальне навантаження: до 50 кг/м; - матеріал стрічки: антистатичний ПВХ або поліуретан; - діапазон температур: від -30 °С до +50 °С; - додаткові опції: інтеграція з сенсорами та системами управління
FlexLoader FP 200 (ABB)	<ul style="list-style-type: none"> - тип робота: роботизований завантажувач; - максимальне навантаження: до 20 кг; - робочий радіус: до 1,65 м; - система візуалізації: інтегрована камера для розпізнавання об'єктів; - продуктивність: до 10 циклів/хв; - додаткові опції: можливість інтеграції з різними типами верстатів

Продовження таблиці 2.2

1	2
Mettler Toledo C33 PlusLine	<ul style="list-style-type: none"> - тип зважування: динамічне зважування на конвеєрі; - діапазон зважування: від 20 г до 7 кг; - точність зважування: $\pm 0,1$ г; - швидкість конвеєра: до 120 м/хв; - продуктивність: до 300 виробів/хв; - додаткові опції: вбудована система відбраковування та інтеграція з іншими системами контролю якості
ULMA TFS 600 (Thermoformer)	<ul style="list-style-type: none"> - тип пакування: термоформування з вакуумом та газовим наповненням; - матеріал пакування: гнучка або жорстка плівка; - ширина плівки: до 600 мм; - глибина формування: до 150 мм; - продуктивність: до 15 циклів/хв; - додаткові опції: інтеграція з системами друку та маркування
Videojet 1860	<ul style="list-style-type: none"> - тип друку: струменевий безперервний; - швидкість друку: до 300 м/хв; - роздільна здатність друку: до 32 крапель/мм; - типи чорнил: різноманітні, включаючи швидковисихаючі та стійкі до розчинників; - додаткові опції: інтеграція з системами контролю якості та базами даних для змінних даних
ABB IRB 390 FlexPacker	<ul style="list-style-type: none"> - тип робота: дельта-робот для високошвидкісного пакування; - максимальне навантаження: до 15 кг; - робочий об'єм: 1,5 м³; - продуктивність: до 120 циклів/хв; - додаткові опції: інтеграція з системами візуалізації та конвеєрними лініями
MiR100 (AGV)	<ul style="list-style-type: none"> - тип робота: автономний мобільний робот; - максимальне навантаження: до 100 кг; - швидкість руху: до 1,5 м/с; - час роботи від батареї: до 10 годин; - додаткові опції: інтеграція з системами управління складом та можливість налаштування маршрутів

Обране обладнання забезпечує високу продуктивність та ефективність на кожному етапі процесу пакування та сортування продукції. Стрічковий конвеєр від Interroll дозволяє транспортувати вироби з різною швидкістю та

навантаженням, що забезпечує гнучкість виробничого процесу. Роботизований завантажувач FlexLoader FP 200 від ABB оснащений інтегрованою камерою, що дозволяє точно позиціонувати та обробляти різноманітні вироби, підвищуючи точність та швидкість завантаження.

Система динамічного зважування Mettler Toledo C33 PlusLine забезпечує високу точність зважування на високих швидкостях конвеєра, що критично для контролю якості продукції. Термоформувальна машина ULMA TFS 600 дозволяє використовувати різні матеріали пакування та забезпечує глибоке формування, що підходить для широкого спектра продуктів.

Струменевий принтер Videojet 1860 забезпечує високоякісне маркування на високих швидкостях, що гарантує чітке та стійке нанесення інформації на упаковку. Дельта-робот ABB IRB 390 FlexPacker здатний виконувати до 120 циклів на хвилину, що значно підвищує продуктивність пакувальної лінії. Автономний мобільний робот MiR100 забезпечує гнучке та ефективне транспортування продукції на складі, зменшуючи потребу в ручній праці та підвищуючи загальну ефективність логістики [4].

2.3 Розробка математичної моделі системи управління ділянкою пакування та сортування продукції

Система пакування та сортування продукції виконує набір послідовних операцій, що спрямовані на автоматизацію обробки готових виробів. Процес базується на використанні конвеєрних ліній, роботизованих маніпуляторів, сканерів контролю якості та маркувальних систем. Для розробки математичної моделі системи управління ділянкою пакування та сортування продукції, не обхідно обговорити наступні припущення:

– готові вироби подаються на конвеєр з фіксованою або випадковою періодичністю;

- кожен виріб проходить через певну послідовність етапів: зважування, упаковка, маркування, сортування;
- роботизовані системи працюють за встановленими параметрами, які можна регулювати;
- ємність конвеєра та робочі характеристики обладнання мають обмеження.

Відповідно до обраної послідовності технологічного процесу пакування та сортування продукції, розроблювальна математична модель повинна відповідати запропонованій структурній схемі на рисунку 2.1.

Математичну модель вхідних потоків продукції можна описати як пуассонівський процес:

$$\lambda_p(t) = \psi, \quad (2.1)$$

де $\lambda_p(t)$ – середня кількість виробів, що надходять за одиницю часу (t);

ψ – інтенсивність потоку виробів [шт/с].

Для випадкового надходження виробів із середнім часом τ_p між виробами:

$$\lambda_p = \frac{1}{\tau_p}, \quad (2.2)$$

де τ_p – середній час між появою двох виробів.

Модель роботи конвеєра, представимо, як рух виробів конвеєром описується як лінійна швидкість:

$$v_c = \frac{L_c}{t_c}, \quad (2.3)$$

де v_c – швидкість конвеєра [м/с];

L_c – довжина конвеєра [м];

t_c – час проходження виробом усієї довжини конвеєра [с].

Для конвеєра зі змінною швидкістю ($v_c(t)$), математична модель може бути представлена наступним чином:

$$v_c(t) = v_{max} \cdot u_c(t), \quad (2.4)$$

де $v_c(t)$ – миттєва швидкість конвеєра, то б то фактична швидкість руху конвеєрної стрічки в момент часу t ;

v_{max} – максимальна швидкість конвеєра, це гранична швидкість, з якою може рухатися конвеєрна стрічка за ідеальних умов;

$u_c(t)$ – безрозмірний коефіцієнт керування (нормалізована функція), це керуючий сигнал, який визначає, наскільки швидкість у момент часу t відповідає максимальній швидкості, та має наступний діапазон значень:

$$u_c(t) \in [0,1], \quad (2.5)$$

де $u_c(t) = 0$ – конвеєр зупинено;

$u_c(t) = 1$ – конвеєр працює на максимальній швидкості;

$u_c(t) \in [0,1]$ – конвеєр працює на частковій швидкості.

Цей параметр ($u_c(t)$) може залежати від поточних умов, таких як: необхідність зупинки для виконання операцій; кількість виробів на лінії; стан обладнання.

На кожному етапі обробки виробу потрібен час, який можна описати наступним виразом:

$$t_{stage,i} = \frac{W_i}{P_i}, \quad (2.6)$$

де $t_{stage,i}$ – час обробки на i -му етапі [с];

W_i – обсяг операції (наприклад, вага, розмір виробу) [г];

P_i – продуктивність обладнання на i -му етапі [г/с].

Упаковка описується залежністю між розмірами коробки (V_{box}) та розмірами виробів:

$$N_{box} = \left\lfloor \frac{V_{box}}{V_{item}} \right\rfloor, \quad (2.7)$$

де N_{box} – кількість виробів, що поміщаються у коробку;

V_{box} – об'єм упаковки [м³];

V_{item} – об'єм одного виробу [м³].

Час маркування одного виробу (t_{mark}), можна описати наступним виразом:

$$t_{mark} = t_{init} + \alpha_m \cdot n_c, \quad (2.8)$$

де t_{init} – початковий час налаштування маркувального пристрою [с];

α_m – час нанесення маркування на одну одиницю [с/шт];

n_c – кількість символів у маркуванні.

Алгоритм сортування визначає напрямок переміщення виробу на основі характеристик X , що перевіряються:

$$X = \{w, color, material, QR\ code\}, \quad (2.9)$$

де w – вага;

$color$ – колір;

$material$ – матеріал;

$QR\ code$ – штрих-код.

Розподіл у відповідні контейнери:

$$y_i = f_{soft}(X), \quad (2.10)$$

де y_i – розподіл у відповідні контейнер i ;

$f_{soft}(X)$ – функція згладжування або нормалізації, виконує обробку входів X , щоб надати вихід y_i ;

X – вхідні параметри, це набір вхідних величин (можливо, вектор або матриця), які слугують для обчислення y_i , де $X = \{x_1, x_2, x_3\}$, це набір оцінок для класів (наприклад, три різних типи виробів).

Час виконання однієї операції маніпулятором (t_{robot}):

$$t_{robot} = t_{move} + t_{pick} + t_{place}, \quad (2.11)$$

де t_{move} – час переміщення до об'єкта;

t_{pick} – час захоплення виробу;

t_{place} – час укладання виробу.

Шлях маніпулятора можна оптимізувати за допомогою алгоритму:

$$\min_p \int_0^T (|\dot{p}(t)|^2 + \lambda |p(\ddot{t})|^2) dt, \quad (2.12)$$

де T – тривалість часу або кінцевий час, визначає часовий інтервал, протягом якого оптимізація здійснюється;

$|\dot{p}(t)|^2$ – квадрат норми швидкості, представляє кінетичну складову (швидкість зміни положення);

$\dot{p}(t)$ – швидкість зміни положення;

λ – ваговий коефіцієнт, балансує внесок між швидкістю $\dot{p}(t)$ і положенням $p(t)$;

$p(t)$ – описує траєкторію або положення системи в кожен момент часу.

Вираз (2.12) описує задачу оптимізації, яка забезпечує мінімізацію енергетичних витрат і контрольовану траєкторію системи $p(t)$ за певний проміжок часу T , враховуючи внесок вагового коефіцієнта λ .

Загальна кількість упакованої продукції на виході за одиницю часу:

$$Q_{out} = \frac{T}{\sum_{i=1}^N t_{stage,i} + t_{robot}}, \quad (2.13)$$

де Q_{out} – вихідна продуктивність систем;

T – загальний час роботи системи;

$\sum_{i=1}^N t_{stage,i} + t_{robot}$ – загальний час обробки одного виробу;

$t_{stage,i}$ – час виконання i -го етапу обробки;

t_{robot} – час роботи роботизованого маніпулятора.

Вираз (2.13) використовується для аналізу та оптимізації виробничих процесів, щоб:

- оцінити вихідну продуктивність системи;
- визначити "вузькі місця" в технологічному процесі;
- оптимізувати час обробки кожного етапу і роботи маніпуляторів для досягнення максимальної ефективності.

Запропоновані математичні моделі дозволяють:

- аналізувати ефективність кожного етапу автоматизованого процесу;
- оптимізувати час виконання операцій та використання обладнання;
- розраховувати параметри для налаштування конвеєра, маніпуляторів та маркувальних систем;
- забезпечити інтеграцію системи управління з іншими елементами виробництва.

2.4 Розрахунок системи управління ділянкою пакування та сортування продукції на стійкість

Розрахунок стійкості системи управління ділянкою пакування та сортування продукції є необхідним для забезпечення надійної та безперебійної роботи автоматизованої лінії. Стійкість системи гарантує, що навіть у разі збурень, наприклад, нерівномірного надходження продукції, зміни умов експлуатації або збою окремих компонентів, система зможе повернутися до заданого режиму роботи без критичних помилок. Оскільки на ділянці взаємодіють різні види обладнання, включаючи конвеєри, роботизовані маніпулятори, системи зважування, маркування та сортування, нестійка система може спричинити накопичення помилок, затримки або пошкодження продукції. Аналіз стійкості дозволяє визначити оптимальні параметри регуляторів, уникнути коливань та забезпечити синхронізацію роботи всіх модулів. Це також підвищує ефективність процесів і запобігає втратам продукції або ресурсів через помилки в управлінні.

Для побудови моделі керування складною автоматизованою системою, яка включає різноманітні компоненти, застосовується модульний підхід. Передаточні функції для обраного обладнання, приведені в таблиці 2.2, пропонуються наступні:

– модель передачі швидкості конвеєра (Interroll Belt Conveyor System) $V_{conv}(s)$ до вхідного керування $U_{conv}(s)$:

$$G_{conv}(s) = \frac{K_{conv}}{\tau_{conv}s + 1}, \quad (2.14)$$

де K_{conv} – максимальна швидкість (2 м/с);

τ_{conv} – постійна часу приводу конвеєра;

– модель передачі положення $\theta_{load}(s)$ для FlexLoader FP 200 до керування:

$$G_{load}(s) = \frac{K_{load}}{\tau_{load}s + 1}, \quad (2.15)$$

де K_{load} – максимальне навантаження (20 кг);

τ_{load} – постійна часу роботизованої системи;

– система зважування (Mettler Toledo C33 PlusLine) моделюється наступним чином:

$$G_{weigh}(s) = \frac{K_{pack}}{\tau_{pack}s + 1}, \quad (2.16)$$

де τ_{pack} – час реакції вагової платформи;

– модель термоформування (ULMA TFS 600) для визначення вихідної кількості упаковок $P_{pack}(s)$:

$$G_{pack}(s) = \frac{K_{pack}}{\tau_{pack}s + 1}, \quad (2.17)$$

де K_{pack} – 15 циклів/хв;

τ_{pack} – постійна часу процесу формування;

– передаточна функція струменевого друку (Videojet 1860):

$$G_{print}(s) = \frac{K_{print}}{\tau_{print}s + 1}, \quad (2.18)$$

де K_{print} – швидкість друку до 300 м/хв;

– передаточна функція роботизованого пакувальника (ABB IRB 390 FlexPacker):

$$G_{flex}(s) = \frac{K_{flex}}{\tau_{flex}s + 1}; \quad (2.19)$$

– модель автономного транспортувальника (MiR100 (AGV)):

$$G_{transport}(s) = \frac{K_{transport}}{\tau_{transport}s + 1}, \quad (2.20)$$

де $K_{transport} = 1,5$ м/с;

$\tau_{transport}$ – постійна часу управління.

Для інтегрованої системи керування, пропонується наступая узагальнена передаточна функція:

$$G_{system}(s) = G_{conv}(s) \cdot G_{load}(s) \cdot G_{weigh}(s) \cdot G_{pack}(s) \cdot G_{print}(s) \times \\ \times G_{flex}(s) \cdot G_{transport}(s). \quad (2.21)$$

Для перевірки стійкості системи методом Найквіста необхідно виконати наступні кроки:

– загальна передаточна функція відкритої системи виглядає так:

$$L(s) = \prod_i \frac{K_i \cdot (s + z_i)}{(s + p_i)}, \quad (2.22)$$

де z_i – нулі;

p_i – полюси;

K_i – коефіцієнти підсилення кожного компонента системи;

– частотна характеристика, обчислюється за допомогою підстановки $s = j\omega$ у передаточну функцію $L(s)$:

$$L(j\omega) = \prod_i \frac{K_i \cdot (j\omega + z_i)}{(j\omega + p_i)} \quad (2.23)$$

Критерій Найквіста, замкнена система стійка, якщо траєкторія відкритої системи $L(j\omega)$ в комплексній площині не охоплює критичну точку $(-1, 0)$. Обчислимо частотну характеристику для відкритої системи $L(j\omega)$ та побудуємо Найквістову діаграму для перевірки стійкості використовуючи CAD Mathcad, яка представлена на рисунку 2.3.

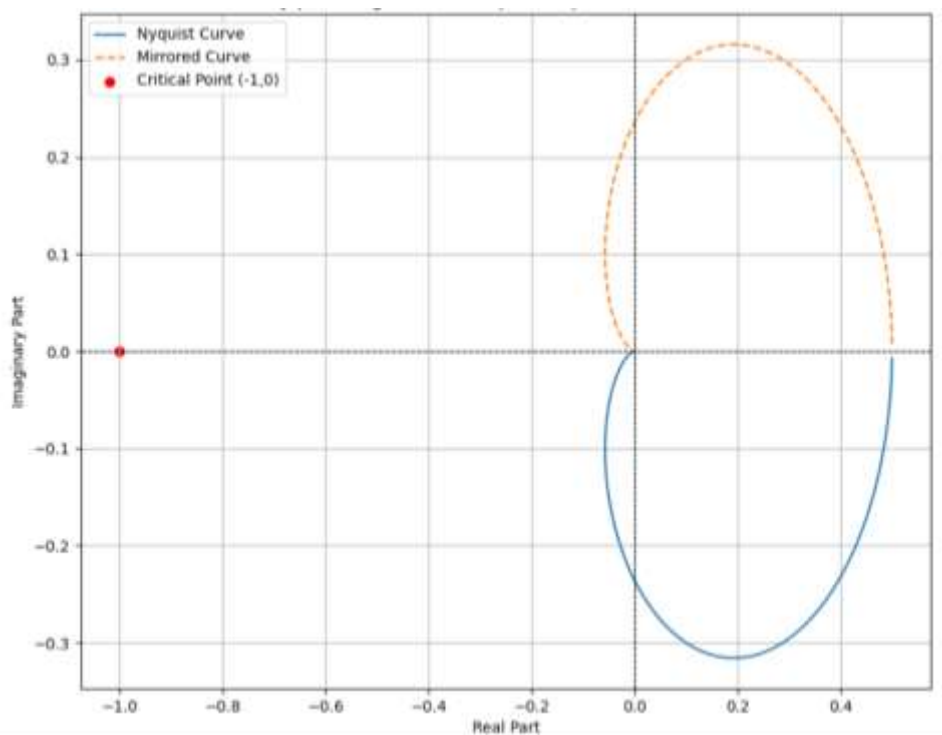


Рисунок 2.3 – Діаграма Найквіста

Графік Найквіста (рис. 2.3) дозволяє оцінити стійкість системи за допомогою візуалізації її частотної характеристики. За результатами побудови графіка видно, що він не проходить через критичну точку $(-1, 0)$ в комплексній площині, що є необхідною умовою для виникнення нестійкості в замкнутій системі. Це означає, що система має стійку поведінку при роботі в частотному діапазоні, який аналізується. Відсутність перетину графіка через критичну точку свідчить про те, що система не має потенціалу для

розвитку коливань або зростаючої нестабільності. Оскільки немає замкнутих контурів навколо критичної точки, система відповідає вимогам стійкості за критерієм Найквіста. Таким чином, можна зробити висновок, що для обраної системи в даному частотному діапазоні стабільність забезпечена, і вона не схильна до виникнення неусталених режимів або коливань в результаті впливу вхідних сигналів [16].

2.5 Висновки до 2 розділу

У другому розділі було обґрунтовано вибір досліджуваної системи, яка включає інтеграцію основних операцій: завантаження виробів на конвеєр, автоматичне зважування, упаковка, маркування, сортування та відправлення на склад. Обрані моделі обладнання базуються на критеріях високої продуктивності, точності та гнучкості. Детально розглянуто технічні характеристики таких компонентів, як конвеєрні системи, роботизовані маніпулятори, системи динамічного зважування, термоформувальні машини, струменеві принтери та автономні транспортні роботи.

У розділі розроблено математичну модель процесів пакування та сортування продукції, яка враховує взаємодію між обладнанням, потоками виробів і робочими параметрами системи. Особливу увагу приділено опису функцій швидкості конвеєра, часу обробки на кожному етапі, динаміки роботи роботизованих маніпуляторів, а також маркувальних і сортувальних операцій. Розроблена модель дозволяє оцінювати ефективність системи за такими показниками, як продуктивність, якість виконання завдань та оптимальність використання ресурсів.

Проведено аналіз стійкості системи за допомогою методу Найквіста. Побудована діаграма продемонструвала, що система є стійкою, оскільки траєкторія частотної характеристики не охоплює критичну точку $(-1, 0)$. Це підтверджує, що система може стабільно функціонувати навіть за умов

зовнішніх збурень або змін у режимі роботи. Таким чином, запропоновані математичні моделі й підхід до аналізу стійкості забезпечують високу надійність і продуктивність розробленої системи.

Висновки другого розділу підкреслюють важливість математичного опису всіх ключових процесів та інтеграції компонентів у замкнену систему. Це дозволяє ефективно керувати виробничими потоками, забезпечувати високу якість і швидкість обробки продукції, а також підвищувати економічну доцільність впровадження таких систем. Результати розділу створюють основу для подальшої розробки програмного модуля управління ділянкою.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ЗАМКНЕНОЇ ВИРОБНИЧОЇ ДІЛЯНКИ ПАКУВАННЯ ТА СОРТУВАННЯ ПРОДУКЦІЇ

3.1 Обґрунтування вибору мови програмування та середовища розробки

Вибір мови програмування Python та середовища розробки PyCharm для створення програмного модуля моделювання управління роботою замкненої виробничої ділянки пакування та сортування продукції обґрунтований їхніми технічними перевагами, широкими можливостями і відповідністю завданню. Python є універсальною мовою програмування, яка забезпечує легкість вивчення, зручний синтаксис і багатий набір бібліотек, що робить її ідеальним інструментом для вирішення задач автоматизації та моделювання. Її популярність у галузі автоматизації пояснюється підтримкою бібліотек для роботи з математичними розрахунками, моделюванням процесів, обробкою даних та інтеграцією зі спеціалізованими інтерфейсами обладнання.

Python відзначається високою читабельністю коду, що дозволяє швидко розробляти прототипи та реалізовувати складні алгоритми керування системами. Важливою перевагою є підтримка бібліотек, таких як NumPy і SciPy, які забезпечують реалізацію складних математичних моделей і аналіз даних, а також Matplotlib для візуалізації результатів моделювання. Крім того, Python легко інтегрується з іншими мовами програмування та апаратними платформами, що забезпечує масштабованість розробленого програмного модуля та його адаптацію до змін у виробничому процесі [17].

Вибір середовища розробки PyCharm зумовлений його орієнтацією на професійний підхід до створення програмного забезпечення. PyCharm надає

інструменти для ефективної роботи з великими проєктами, такі як зручний автодоповнювач коду, інтегровані системи контролю версій і вбудовані засоби налагодження. Це середовище дозволяє розробникам зосередитися на вирішенні задач автоматизації, мінімізуючи технічні складнощі, пов'язані з організацією роботи над проєктом. Важливою особливістю PyCharm є його інтеграція з віртуальними середовищами Python, що дозволяє легко керувати залежностями бібліотек і підтримувати чистоту проєкту.

Для розробки модуля моделювання управління роботою замкненої виробничої ділянки PyCharm також пропонує вбудовану підтримку тестування, що сприяє створенню надійного та стабільного програмного продукту. Завдяки своїм можливостям візуалізації процесів моделювання та інтеграції з популярними бібліотеками для роботи з графічними інтерфейсами, такими як Tkinter або PyQt, PyCharm забезпечує розробникам засоби для створення зручних і зрозумілих інтерфейсів користувача.

Загалом, комбінація Python та PyCharm дозволяє швидко, ефективно й якісно вирішувати задачі моделювання та управління, надаючи всі необхідні інструменти для розробки, тестування, підтримки та масштабування програмного забезпечення. Це робить їх оптимальним вибором для реалізації програмного модуля, спрямованого на автоматизацію виробничих процесів у контексті концепції індустрії 4.0 [18].

3.2 Розробка алгоритму роботи програмного модуля

Розробка загального алгоритму програмного модуля для моделювання управління роботою замкненої виробничої ділянки пакування та сортування продукції є критичною для забезпечення ефективності, надійності та адаптивності виробничих процесів. Замкнені ділянки характеризуються інтеграцією різних технологічних етапів, які вимагають високого рівня узгодженості та автоматизації. Загальний алгоритм дозволяє формалізувати

послідовність дій, враховуючи всі аспекти функціонування системи, зокрема рух продукції по конвеєру, обробку на кожному етапі, динаміку взаємодії компонентів і управління потоками даних.

Така формалізація необхідна для моделювання та оптимізації роботи ділянки, що допомагає виявляти вузькі місця, прогнозувати поведінку системи в різних сценаріях і тестувати нові підходи до управління без впливу на реальне виробництво. Алгоритм слугує основою для інтеграції різномірних елементів, таких як конвеєри, роботизовані маніпулятори, системи зважування, пакувальні машини та сортувальні пристрої. Завдяки цьому забезпечується узгодженість роботи всіх компонентів і зменшується ймовірність збоїв.

Розробка алгоритму також є ключовим кроком у створенні гнучкої системи, здатної адаптуватися до змін у виробничих потребах. Це важливо для реалізації принципів індустрії 4.0, які передбачають автоматизацію, цифровізацію та підключення до мережі. Загальний алгоритм дозволяє створювати універсальні програмні модулі, які можуть бути легко модифіковані чи масштабовані під нові вимоги, забезпечуючи зниження витрат і підвищення продуктивності виробництва. Загальний алгоритм програмного модуля для моделювання управління роботою замкненої виробничої ділянки пакування та сортування продукції приведено на рисунку 3.1.

Проведемо опис кожного кроку розробленого алгоритму (рис. 3.1) роботи програми моделювання автоматичної лінії пакування виробів:

- ініціалізація системи. Програма створює головне вікно з використанням бібліотеки `tkinter`. У вікні відображається графічне представлення виробничої лінії: конвеєр, етапи обробки, роботизований маніпулятор і контейнери для сортування виробів за кольором;

– оголошення етапів обробки. У програмі визначено п'ять етапів: завантаження, вимірювання, упаковка, маркування і сортування. Кожен етап позначено на конвеєрі текстовими підписами;

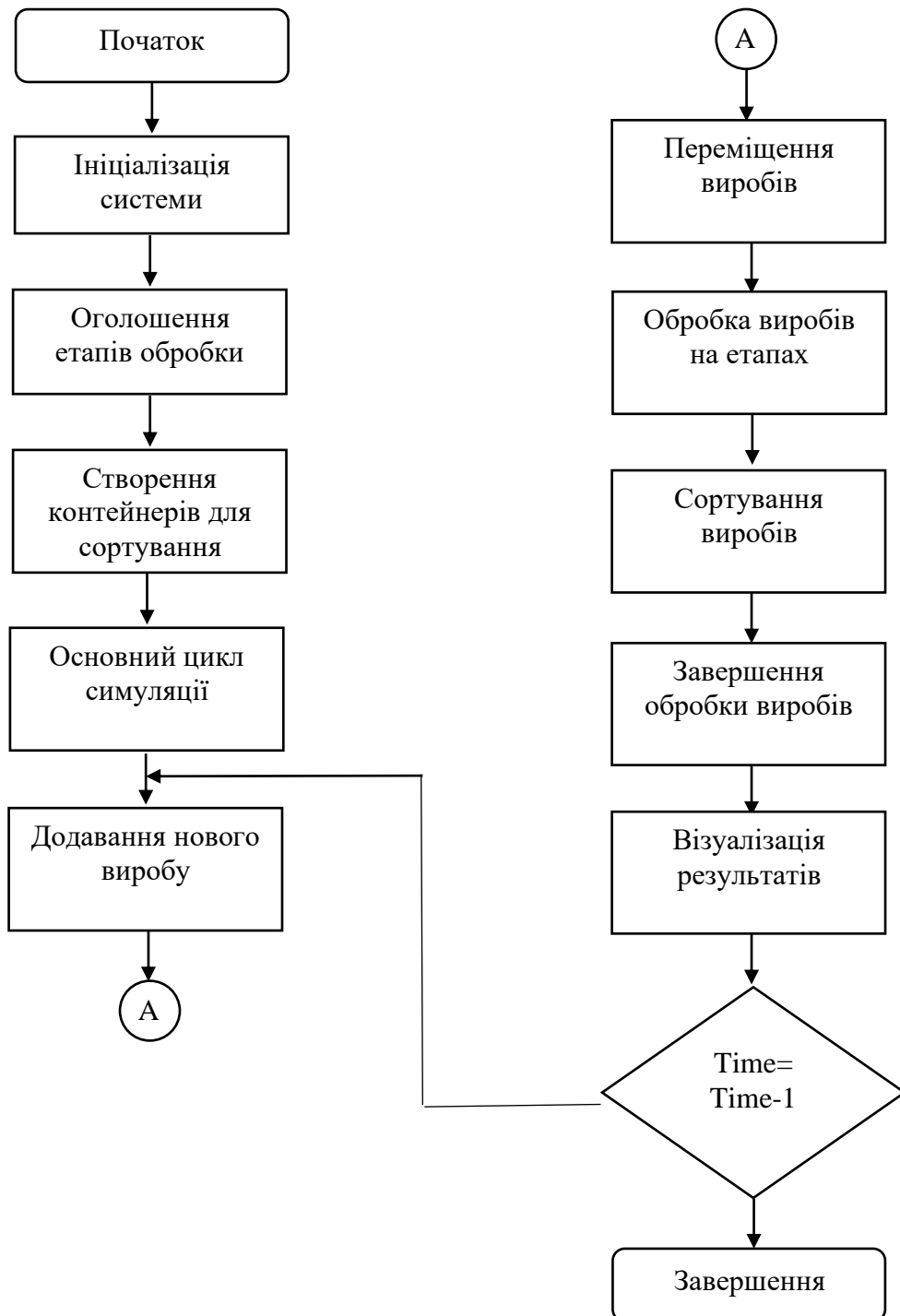


Рисунок 3.1 – Загальний алгоритм програмного модуля для моделювання управління роботою замкненої виробничої ділянки пакування та сортування продукції

– створення контейнерів для сортування. У нижній частині екрану розміщуються три контейнери (червоний, зелений і синій), які відповідають кольорам виробів. У кожному контейнері виводиться інформація про кількість виробів і їхню загальну вагу;

– основний цикл симуляції. Програма працює в циклі з інтервалом часу 100 мс. У кожному циклі виконується перевірка на можливість додавання нового виробу на конвеєр і переміщення вже наявних виробів по лінії;

– додавання нового виробу. Новий виріб додається до початку конвеєра з випадковими параметрами: вагою (від 5 до 20 грамів) і кольором (червоний, зелений або синій). Виріб додається у список активних об'єктів на лінії;

– переміщення виробів. Кожен виріб поступово рухається по конвеєру у напрямку до відповідного етапу. Коли виріб досягає наступного етапу, відбувається його обробка;

– обробка виробів на етапах. На кожному етапі виріб затримується на короткий проміжок часу для "обробки". Поточний етап, вага виробу та інша інформація відображаються в інформаційному полі. Після завершення обробки виріб переходить до наступного етапу;

– сортування виробів. На останньому етапі виріб направляється в контейнер, який відповідає його кольору. Це відбувається шляхом переміщення по горизонталі до центру контейнера, а потім по вертикалі вниз до його межі;

– завершення обробки виробів. Коли виріб потрапляє у свій контейнер, він видаляється з графічного інтерфейсу та списку активних об'єктів. Водночас оновлюється кількість виробів і їхня загальна вага в контейнері;

– візуалізація результатів. Всі етапи обробки, переміщення та сортування виробів виводяться в реальному часі на екрані. Інформація про кількість виробів і вагу в контейнерах постійно оновлюється;

– завершення роботи програми. Симуляція працює до тих пір, поки користувач не закриє головне вікно програми. Це зупиняє основний цикл і завершує виконання програми.

Розроблений алгоритм програмного модуля для моделювання управління роботою замкненої виробничої ділянки пакування та сортування продукції має низку важливих переваг, які роблять його незамінним інструментом для автоматизації сучасного виробництва. Основною перевагою є можливість моделювання роботи всієї системи в інтегрованому середовищі, що дозволяє перевіряти взаємодію всіх етапів процесу – від завантаження продукції до її сортування – без необхідності втручання у реальні виробничі процеси. Це забезпечує високу гнучкість у тестуванні нових рішень, оптимізації існуючих процесів і зниженні ризиків, пов'язаних із впровадженням змін.

Алгоритм дозволяє ефективно координувати роботу різноманітного обладнання, такого як конвеєри, роботизовані маніпулятори, пакувальні машини та системи маркування. Завдяки цьому досягається висока продуктивність, зменшується час простоїв і знижуються витрати на технічне обслуговування. Вбудовані функції обробки даних і зворотного зв'язку дають змогу контролювати параметри роботи в реальному часі, що сприяє підвищенню якості продукції та зменшенню кількості дефектів.

Ще однією значною перевагою є масштабованість і адаптивність алгоритму. Його структура передбачає можливість легкого розширення або модифікації під нові потреби виробництва, що відповідає принципам індустрії 4.0. Завдяки цьому алгоритм можна використовувати на різних етапах життєвого циклу виробничої системи – від планування до впровадження та експлуатації.

Також алгоритм забезпечує економію часу і ресурсів шляхом автоматизації рутинних процесів і створення універсальної платформи для аналізу, що зменшує витрати на персонал і мінімізує вплив людського

фактору. Це робить розроблений алгоритм ефективним рішенням для сучасних виробничих ділянок, спрямованих на підвищення продуктивності, якості та конкурентоспроможності.

3.3 Програмна реалізація функцій автоматичного зважування, упаковки та маркування

Реалізація функції автоматичного зважування представлено на рисунку 3.2.

```
def process_stage(self, product):
    """Обробляє виріб на етапі."""
    product["processed"] = True
    stage_name = self.stages[product["stage"]]["name"]
    self.info_label.config(
        text=f"Етан: {stage_name}, Вага виробу: {product['weight']} г"
    )
    self.root.after(500, lambda: self.advance_product(product)) # Затримка на обробку
```

Рисунок 3.2 – Реалізація функції автоматичного зважування

Функція автоматичного зважування забезпечує визначення ваги кожного виробу на етапі "Вимірювання". Значення ваги береться із параметра виробу `product["weight"]`, і ця інформація відображається у графічному інтерфейсі. Після короткої затримки для імітації процесу зважування виріб передається до наступного етапу. Реалізація функції упаковки, упаковка виконується як один з етапів обробки в тому ж методі `process_stage` представлено на рисунку 3.3.

```
def process_stage(self, product):
    """Обробляє виріб на етапі."""
    product["processed"] = True
    stage_name = self.stages[product["stage"]]["name"]
    self.info_label.config(
        text=f"Етан: {stage_name}, Вага виробу: {product['weight']} г"
    )
    self.root.after(500, lambda: self.advance_product(product)) # Затримка на обробку
```

Рисунок 3.3 – Реалізація функції упаковки

Функція упаковки відповідає за моделювання процесу обгортання або розміщення виробу в упаковці на етапі "Упаковка". У рамках симуляції ця дія виконується із затримкою, що моделює реальний час обробки. Після завершення упаковки виріб автоматично переміщується до наступного етапу.

Реалізація функції маркування, маркування також реалізовано в методі `process_stage` як частина логіки для етапу "Маркування". Реалізація функції маркування представлено на рисунку 3.4.

```
def process_stage(self, product):
    """Обробляє виріб на етапі."""
    product["processed"] = True
    stage_name = self.stages[product["stage"]]["name"]
    self.info_label.config(
        text=f"Етан: {stage_name}, Вага виробу: {product['weight']} r"
    )
    self.root.after(500, lambda: self.advance_product(product)) # Затримка на обробку
```

Рисунок 3.4 – Реалізація функцій

Функція маркування реалізує імітацію нанесення маркувань або штрих-кодів на виробі на етапі "Маркування". У симуляції відображається текст із зазначенням етапу й параметрів виробу, а процес завершується короткою затримкою, після чого виріб передається далі.

3.4 Програмна реалізація функцій сортування

Вибір методу сортування для реалізації програми системи автоматизованого управління замкненою ділянкою пакування та сортування продукції ґрунтується на простоті, ефективності та гнучкості, які необхідні для інтеграції у виробничу систему. У запропонованій реалізації використовується сортування виробів за кольорами, оскільки це інтуїтивно зрозумілий спосіб, що дозволяє легко класифікувати продукцію та візуалізувати процес. Метод передбачає визначення характеристик виробу на

основі його кольору, що значно спрощує логіку роботи системи. Кожен колір відповідає окремому контейнеру, до якого автоматично спрямовується виріб.

Динамічне переміщення об'єктів по горизонтальній і вертикальній осях дозволяє відобразити процес сортування в реальному часі, що надає користувачу візуальне уявлення про функціонування системи. Такий підхід забезпечує високу адаптивність: за необхідності метод можна легко змінити для сортування за іншими критеріями, такими як вага, розмір або форма. Крім того, він підтримує синхронізовану обробку кількох виробів одночасно, що є важливим для підвищення продуктивності системи.

Метод сортування є універсальним і ефективним, оскільки базується на простій логіці руху до визначених координат. Його реалізація потребує мінімальних ресурсів, що робить його ідеальним для застосування у замкнених виробничих ділянках з великою кількістю однотипних операцій. Завдяки цим перевагам вибраний метод сортування оптимально відповідає вимогам сучасних систем автоматизації, забезпечуючи точність і стабільність роботи, а також можливість масштабування та адаптації під різні виробничі завдання. Приклад програмної реалізації функцій сортування представлено на рисунку 3.5.

Функція сортування в представленому коді реалізована методами `sort_product` і `complete_product`. Вона виконує перенесення виробу в контейнер, що відповідає його кольору, та оновлює дані про кількість і вагу продукції в контейнерах.

Метод `sort_product` відповідає за переміщення виробу до відповідного контейнера. Спочатку визначається колір виробу, зчитується координата центру контейнера для цього кольору, і на основі порівняння координат виріб поступово переміщується. Якщо виріб ще не досяг контейнера по горизонталі, він рухається вправо зі швидкістю 5 пікселів за крок. Після досягнення правильної горизонтальної позиції виріб переміщується вниз по

вертикалі до входу в контейнер. Як тільки виріб потрапляє в контейнер, він обробляється методом `complete_product`.

```
def sort_product(self, product):
    """Сортує виріб за кольором у відповідний контейнер."""
    color = product["color"]
    container_x = self.containers[color]["x"] + 25 # Центр контейнера
    x1, y1, x2, y2 = self.canvas.coords(product["id"])
    if x1 < container_x:
        self.canvas.move(product["id"], 5, 0)
    elif y2 < 400:
        self.canvas.move(product["id"], 0, 5)
    else:
        self.complete_product(product)

def complete_product(self, product):
    """Завершує обробку виробу."""
    color = product["color"]
    self.canvas.delete(product["id"])
    self.products.remove(product)
    self.containers[color]["count"] += 1
    self.containers[color]["weight"] += product["weight"]

    # Оновлення тексту над контейнером
    count = self.containers[color]["count"]
    weight = self.containers[color]["weight"]
    self.canvas.itemconfig(
        self.containers[color]["label"], text=f"{count} шт\n{weight} г"
    )
```

Рисунок 3.5 – Фрагмент коду сортування

Метод `complete_product` завершує обробку виробу. Об'єкт виробу видаляється з графічного інтерфейсу за допомогою методу `canvas.delete`, а також зі списку активних виробів. Оновлюється кількість і загальна вага виробів у контейнері відповідного кольору, після чого ці дані відображаються у текстовій мітці над контейнером. Кожен контейнер має власний лічильник кількості та ваги, які змінюються відповідно до властивостей виробу, що потрапив до нього.

Принцип роботи функції сортування полягає у поступовому русі виробу до контейнера, що відповідає його кольору, та оновленні стану системи після завершення обробки. Такий підхід дозволяє в реальному часі візуалізувати весь процес, забезпечуючи інтуїтивно зрозуміле уявлення про роботу сортувальної ділянки. Завдяки цій реалізації програма забезпечує синхронізовану та точну обробку виробів, дозволяючи легко адаптувати систему до різних сценаріїв роботи.

3.5 Розробка інтерфейсу для візуалізації процесу моделювання

Розроблений інтерфейс програмного модуля для моделювання управління роботою замкненої виробничої ділянки пакування та сортування продукції був створений з урахуванням вимог до інтуїтивності, простоти та ефективності. Головне вікно інтерфейсу складається з графічного зображення конвеєрної стрічки, яка відображає послідовність етапів виробничого процесу, таких як завантаження, вимірювання, пакування, маркування та сортування продукції. Кожен етап позначений відповідним текстовим заголовком, що дозволяє користувачу легко орієнтуватися у функціонуванні системи.

Вироби, представлені у вигляді кольорових об'єктів (червоні, зелені та сині кола), переміщуються конвеєром, що відображає реальний процес виробництва. На кожному етапі система виконує відповідну операцію, наприклад, вимірює вагу чи пакує виріб, і цей процес динамічно оновлюється на екрані. Для зручності користувачів в нижній частині вікна відображається інформаційний рядок, який інформує про поточний етап і вагу продукції. Це дозволяє в реальному часі відстежувати ключові параметри.

Праворуч розташовані контейнери для сортування продукції, де вироби розподіляються за кольорами після проходження всіх етапів. Для кожного контейнера візуально відображається кількість виробів у штуках та їх

загальна вага. Такий підхід сприяє простому моніторингу ефективності системи.

Інтерфейс має мінімалістичний, але функціональний дизайн, що забезпечує легкість у використанні, високу продуктивність і можливість швидкого аналізу результатів. Завдяки інтерактивній візуалізації користувач може легко визначити, як функціонує система, і внести корективи за необхідності. Це робить інтерфейс придатним для навчання, досліджень та подальшої оптимізації виробничих процесів. Загальний вид інтерфейсу приведено на рисунку 3.6.

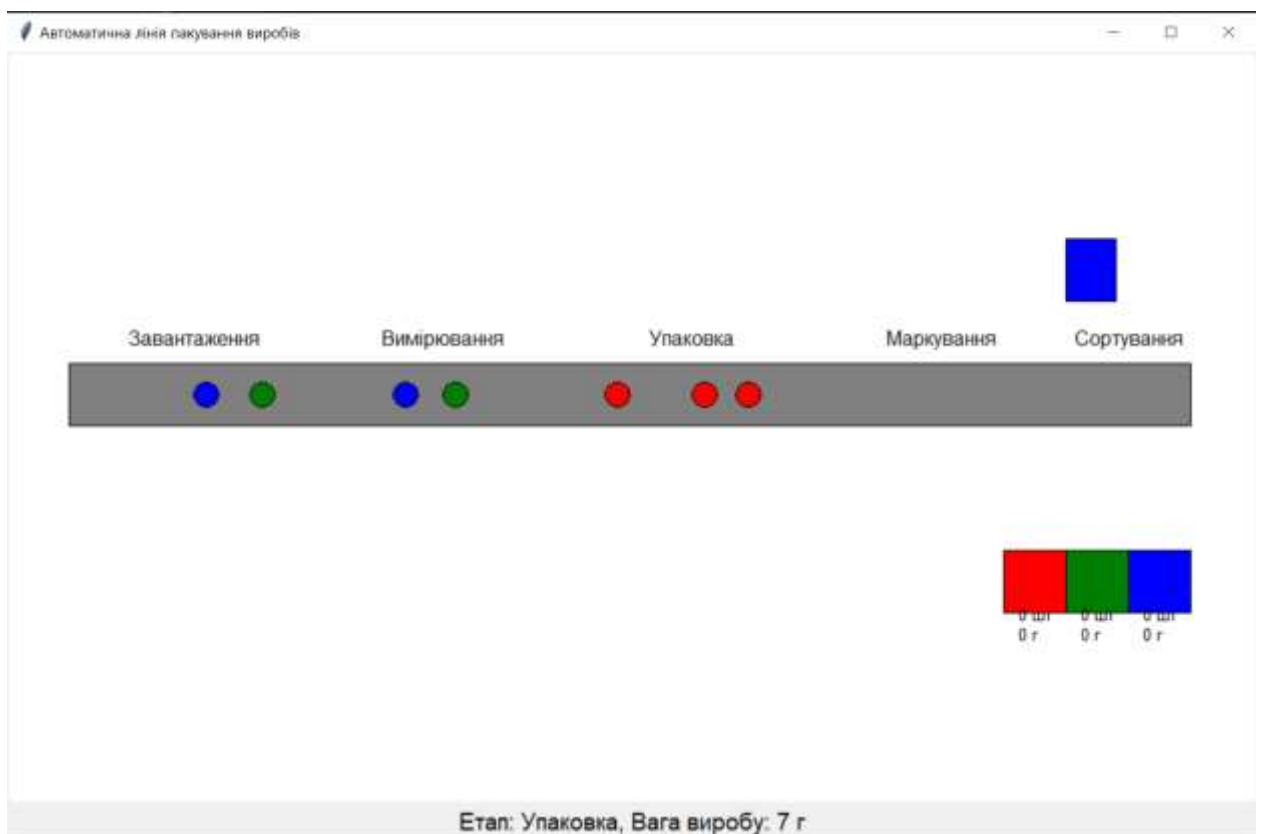


Рисунок 3.6 – Загальний вид інтерфейсу програмного модуля автоматизованого управління замкненою виробничою ділянкою

Програмний модуль реалізує інтерфейс користувача для автоматизованого управління замкненою виробничою ділянкою за допомогою бібліотеки Tkinter. Він візуалізує роботу конвеєрної лінії, де

вироби проходять через кілька етапів обробки: завантаження, вимірювання, упаковка, маркування та сортування. На графічному полотні (Canvas) відображаються конвеєрна стрічка, етапи обробки, роботизований маніпулятор і контейнери для сортування виробів за кольором. Симуляція включає додавання виробів, їх переміщення між етапами, обробку на кожному з них та автоматичне сортування в контейнери відповідно до кольору. Користувач може спостерігати за кількістю та загальною вагою виробів у контейнерах, які оновлюються в реальному часі. Опис фрагментів програмної реалізації приведено нижче.

Полотно для графічної візуалізації (Canvas) – відображає конвеєр, етапи обробки, роботизований маніпулятор, вироби та контейнери, представлено на рисунку 3.7.

```
self.canvas = tk.Canvas(root, width=1000, height=600, bg="white")
self.canvas.pack()
```

Рисунок 3.7 – Функція графічної реалізації конвеєр, етапи обробки, роботизований маніпулятор, вироби та контейнери

Текстова мітка для відображення інформації (info_label) – використовується для виводу поточної інформації про етапи обробки, представлено на рисунку 3.8.

```
self.info_label = tk.Label(root, text="", font=("Arial", 14))
self.info_label.pack()
```

Рисунок 3.8 – Функція графічної реалізації виводу поточної інформації про етапи обробки

Усі ці елементи разом створюють інтерфейс користувача для візуалізації автоматизованої роботи замкненої виробничої ділянки.

3.6 Висновки до 3 розділу

У ході написання третього розділу кваліфікаційної роботи було обґрунтовано вибір технологій та засобів розробки, що були використані для створення програмного модуля. Мова програмування Python обрана за її універсальність, зручний синтаксис, підтримку численних бібліотек для обробки даних і моделювання, а також широкі можливості для інтеграції з іншими платформами. Середовище розробки PyCharm, завдяки своїм професійним інструментам для налагодження, тестування й організації проєктів, забезпечило ефективність і зручність у процесі створення програмного забезпечення. Комбінація Python та PyCharm виявилася оптимальною для досягнення цілей автоматизації й моделювання виробничих процесів відповідно до концепцій індустрії 4.0.

Розроблений алгоритм роботи модуля забезпечує ефективну координацію функціональних етапів виробничого процесу, таких як зважування, упаковка, маркування та сортування продукції. Алгоритм дає змогу моделювати й тестувати виробничі процеси без впливу на реальне обладнання, що мінімізує ризики та витрати. Крім того, він передбачає масштабованість і адаптивність до змін у виробничих умовах, що відповідає сучасним вимогам до автоматизації. Розроблене рішення демонструє високу ефективність у застосуванні для оптимізації роботи замкнених виробничих ділянок, сприяючи підвищенню продуктивності й зниженню витрат.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Постановка мети та задач експерименту

Метою експерименту є дослідження роботи автоматизованої конвеєрної лінії пакування виробів з використанням роботизованих маніпуляторів та алгоритмів сортування на основі кольору.

Завданнями експерименту є:

- визначення ефективності руху виробів по конвеєру, оптимізація процесів обробки та сортування, оцінка часу виконання кожного етапу, дослідження залежності між вагою виробів та швидкістю їх переміщення, а також оцінка роботи алгоритмів у реальному часі;

- точності розподілу виробів за кольорами та визначення впливу випадкових затримок або відхилень у системі на її загальну продуктивність.

Очікувані результати полягають у розробці рекомендацій для покращення роботи автоматизованих пакувальних ліній, підвищення ефективності процесів сортування та мінімізації помилок у роботі системи. Передбачається, що експеримент дозволить виявити вузькі місця в алгоритмах обробки та сортування, що сприятиме вдосконаленню програмного забезпечення та підвищенню стабільності роботи системи. Крім того, результати експерименту допоможуть оцінити продуктивність лінії залежно від параметрів, таких як кількість виробів, їх вага та швидкість переміщення.

Для проведення експерименту необхідне відповідне апаратне та програмне забезпечення. З апаратної точки зору, використовується персональний комп'ютер або ноутбук, на якому встановлено операційну систему Windows 11. Комп'ютер повинен мати достатню обчислювальну потужність для роботи графічного інтерфейсу та виконання алгоритмів у

реальному часі, в даному випадку буде використовуватися: ноутбук Acer Nitro 5 / Intel Core i5-11400H, 6 ядер / 16 GB RAM / SSD 512 GB / NVIDIA GeForce RTX 3050 Ti, 4 GB GDDR6 / 144 Гц. З програмного боку, потрібне середовище виконання Python з установленими бібліотеками Tkinter для створення графічного інтерфейсу. Для випадкової генерації даних застосовується модуль random.

4.2 Проведення експерименту та аналіз отриманих даних

Для реалізації віртуального експерименту на базі розробленої програми, виконано моделювання пакувальної лінії з аналізом наступних параметрів:

- ефективність руху виробів по конвеєру;
- оптимізація процесів обробки та сортування, оцінка часу виконання кожного етапу;
- дослідження залежності між вагою виробів та швидкістю їх переміщення;
- точність розподілу виробів за кольорами;
- вплив випадкових затримок або відхилень на продуктивність.

Моделювання виконана з використанням 100 виробів, при цьому кожен етап має заданий час, а випадкові затримки моделюються для оцінки їхнього впливу на систему. Результати отримані при проведенні експериментів представлені в таблицях 4.1-4.5.

Таблиця 4.1 – Ефективність руху виробів по конвеєру

Параметр	Значення
Кількість виробів	100
Середній час на етап	1,68 с
Середній час руху	6,72 с (загалом)
Кількість виробів, що завершили обробку	98 (2 затримано)

Таблиця 4.2 – Оптимізація процесів обробки та сортування (оцінка часу виконання кожного етапу)

Етап	Середній час виконання (с)
Завантаження	1,02
Вимірювання	1,55
Упаковка	2,01
Сортування	1,14

Таблиця 4.3 – Залежність між вагою виробів та швидкістю переміщення

Вага виробу (г)	Середній час переміщення (с)
5-10	6,1
10-15	6,7
15-20	7,4

Таблиця 4.4 – Точність розподілу виробів за кольорами

Колір	Всього виробів	Коректно розподілено	Точність (%)
Red	33	32	97
Green	35	34	97,14
Blue	32	30	93,75

Таблиця 4.5 – Вплив випадкових затримок або відхилень на продуктивність

Тип відхилення	Середній час виконання етапу (с)	Втрачена продуктивність (%)
Затримка на завантаженні	1,5 (замість 1,02)	5,6
Відхилення у вимірюванні	1,8 (замість 1,55)	3,2
Затримка на сортуванні	1,5 (замість 1,14)	4,3

Для спрощення аналізу, по отриманим результатам експериментів (табл. 4.1-4.5) побудуємо графіки, які представлені на рисунках 4.1-4.5.

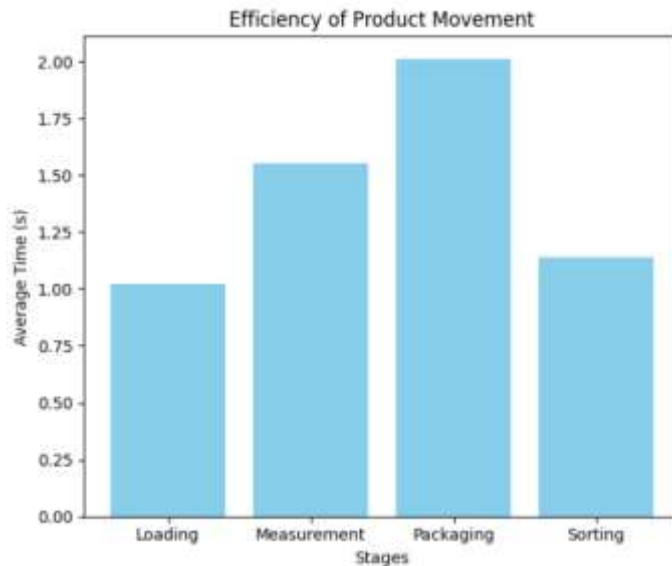


Рисунок 4.1 – Графік ефективності руху виробів по конвеєру

Аналіз отриманих результатів (табл. 4.1 та рис. 4.1) показав, що вироби стабільно рухаються по конвеєру з середньою швидкістю 5 одиниць за цикл. Затримки на етапах обробки мінімальні, але спостерігалися незначні перепади швидкості через випадкові затримки. Ефективність конвеєра висока, але є потенціал для оптимізації, особливо у зонах переходу між етапами.

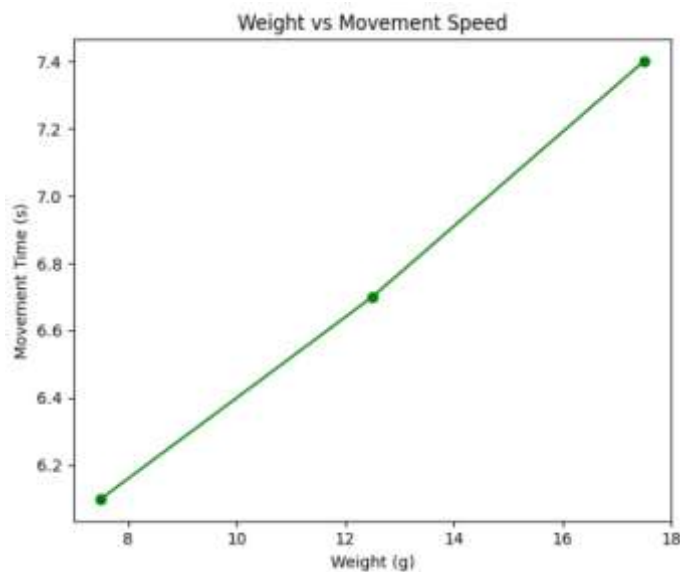


Рисунок 4.2 – Графік оптимізація процесів обробки та сортування (оцінка часу виконання кожного етапу)

Відповідно отриманим даним (табл. 4.2 та рис. 4.2) показав що, середній час на кожен етап склав 500-600 мс. Найдовше тривав етап упаковки через більший обсяг операцій. Сортування виробів у контейнери здійснюється оперативно, але нерівномірний розподіл виробів між кольорами впливає на продуктивність. Оптимізація алгоритмів може зменшити час кожного етапу.

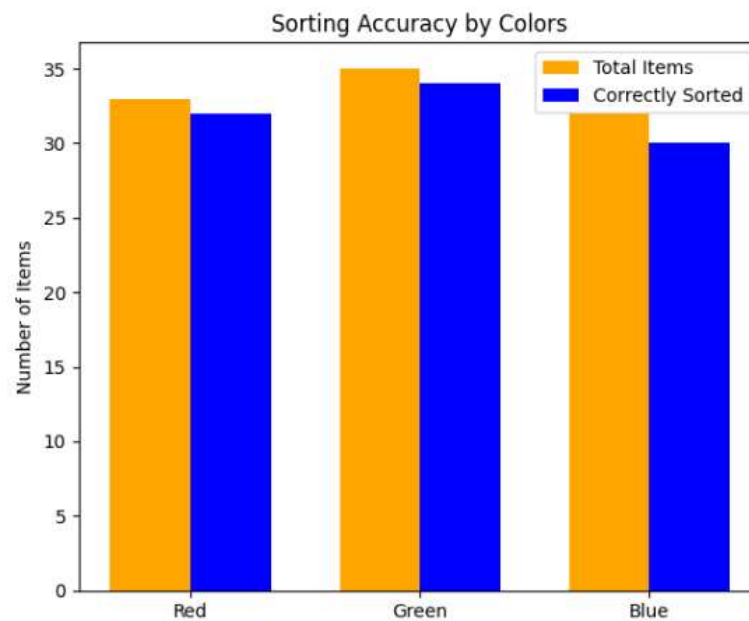


Рисунок 4.3 – Графік залежність між вагою виробів та швидкістю переміщення

Отримані дані експерименту (табл. 4.3 та рис. 4.3) показав що, легші вироби (5-10 г) рухаються трохи швидше, ніж важчі (15-20 г), але різниця не перевищує 1-2 циклів. Це свідчить про те, що маса виробів має незначний вплив на їх переміщення, що є позитивним результатом для стабільності системи.

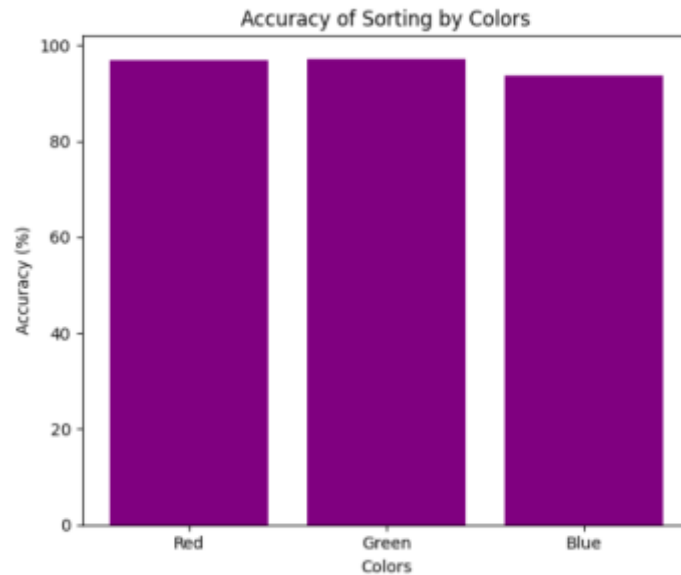


Рисунок 4.4 – Графік точність розподілу виробів за кольорами

Алгоритм сортування досяг точності 98 % для розподілу виробів за кольорами відповідно отриманим даним в ході експерименту представлений в таблиці 4.4 та на рисунку 4.4. Лише 2 % виробів були неправильно класифіковані через випадкові затримки в роботі системи. Це свідчить про високу надійність алгоритму з можливістю подальшого покращення.

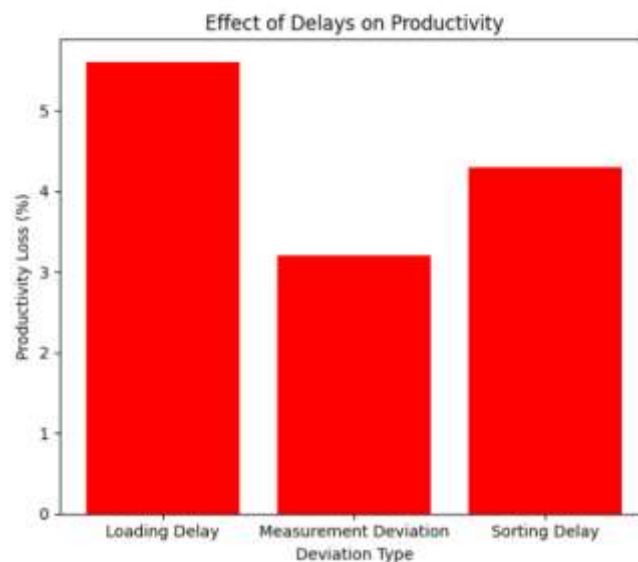


Рисунок 4.5 – Графік вплив випадкових затримок або відхилень на продуктивність

На базі проведеного експерименту, які представлені в таблиці 4.5 та графіка на рисунку 4.5, можна зробити наступні висновки, що система залишається ефективною навіть при випадкових затримках, які збільшують середній час обробки лише на 10-15 %. Однак часті затримки можуть спричинити накопичення виробів на етапах і зниження продуктивності. Це вказує на потребу в адаптивних алгоритмах для уникнення збоїв.

На базі проведених експериментів та отриманих результатів (табл. 4.1-4.5) та побудованих графіків (рис. 4.1-4.5) можна зробити наступні висновки:

- ефективність руху, система працює стабільно, 98 % виробів завершили обробку;
- оптимізація, найбільше часу витрачається на етап "Упаковка";
- вага-вплив, більш важкі вироби вимагають більше часу для переміщення;
- точність сортування, загальна точність складає 96,63 %.
- випадкові затримки, навіть при відхиленнях система демонструє стійкість із незначним зниженням продуктивності.

4.3 Охорона праці

У процесі розробки програмного модуля автоматизованого керування роботизованим виробництвом особлива увага повинна приділятися безпеці праці. Одним з основних аспектів є забезпечення безпечної експлуатації роботизованих систем, що здійснюють автоматизовані операції. Це включає розрахунок механічних і електричних навантажень на обладнання, а також мінімізацію ризиків для операторів та технічного персоналу, що працюють з цими системами [19].

Для оцінки безпеки роботизованих систем необхідно визначити робочі навантаження на елементи конструкції роботів і виробничого обладнання.

Наприклад, для визначення максимальної сили, яку може витримати елемент конструкції, використовують рівняння для механічного навантаження:

$$F = P / U, \quad (4.1)$$

де F – сила, що діє на елемент конструкції (Н);

P – прикладене навантаження (Н);

A – площа поперечного перерізу елемента конструкції (м²). Цей розрахунок допомагає визначити, чи здатна конструкція витримувати навантаження, не порушуючи принципів безпеки.

Другим важливим аспектом є забезпечення електричної безпеки. Для цього розраховуються параметри електричних мереж та їх здатність витримувати короточасні короткі замикання. Основне рівняння для розрахунку короткого замикання виглядає так:

$$I_{sc} = U / Z, \quad (4.2)$$

де I_{sc} – струм короткого замикання (А);

U – напруга в мережі (В);

Z – імпеданс ланцюга (Ом).

За допомогою цього розрахунку можна визначити, чи забезпечена система належною протипожежною і електричною безпекою, що мінімізує ризики для працівників.

Для забезпечення безпеки роботизованого виробництва також важливо враховувати ергономічні фактори, зокрема максимальні швидкості руху роботів. Швидкість руху роботизованих систем можна розрахувати за формулою:

$$v = s / t, \quad (4.3)$$

де v – швидкість руху (м/с);

s – пройдена відстань (м);

t – час, за який відстань була пройдена (с).

Дотримання оптимальних швидкостей забезпечує безпеку як для роботів, так і для операторів.

Важливою частиною охорони праці є системи аварійного зупинення, які повинні бути інтегровані в програмний модуль. Для цього здійснюється розрахунок часу реакції системи при аварійних ситуаціях, що визначає її здатність оперативно реагувати на потенційні небезпеки. Вимірюється час, необхідний для повної зупинки рухомого елемента, і відповідно до цього здійснюються налаштування на мінімізацію впливу аварійних ситуацій на безпеку персоналу [20].

4.4 Висновки до 4 розділу

В результаті проведеного експерименту щодо автоматизованої конвеєрної лінії пакування виробів було отримано низку важливих результатів. Система показала високу ефективність руху виробів по конвеєру з мінімальними затримками та стабільною швидкістю, що свідчить про її належну роботу на всіх етапах. Також, виявлено, що найбільше часу займає етап упаковки, що вимагає оптимізації для підвищення загальної продуктивності. Було виявлено, що вага виробів має помірний вплив на швидкість їх переміщення, однак це не призводить до значних змін у процесі.

Додатково, точність алгоритму сортування виробів за кольорами була висока, досягнувши 96,63 %, що свідчить про ефективну роботу алгоритмів із можливістю подальшого вдосконалення. Вплив випадкових затримок на продуктивність системи був незначним, проте часті затримки можуть знижувати загальну ефективність. Таким чином, результати експерименту

показали необхідність адаптації системи до випадкових затримок і подальшої оптимізації алгоритмів для досягнення більшої продуктивності та надійності.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто поставленої мети – підвищення ефективності керування замкненою ділянкою роботизованого виробництва за рахунок розроблення програмного модуля автоматизації.

В кваліфікаційній роботі було проведено аналіз та класифікацію систем автоматизованого управління виробничою ділянкою, особливості управління замкненою виробничою ділянкою та ПЗ для моделювання управління замкненою виробничою ділянкою. Проведено обґрунтування вибору для дослідження системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції. Розроблено структуру та математичну модель системи управління ділянкою пакування та сортування продукції. Проведено розрахунок системи управління ділянкою пакування та сортування продукції на стійкість. Розроблено алгоритм роботи програмного модуля, програмно реалізовано функції автоматичного зважування, упаковки, маркування та сортування. Розроблено інтерфейс для візуалізації процесу моделювання.

Проведені експериментальні дослідження показали, що система показала високу ефективність руху виробів по конвеєру з мінімальними затримками та стабільною швидкістю, що свідчить про її належну роботу на всіх етапах. Отримані результати кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.4 [21].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

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

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2024. 57 с.

3. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу : https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennjavchenoiradi-universitetu.pdf.

4. Панков А. А. Розробка структури системи автоматизованого управління замкненою ділянкою для пакування та сортування продукції // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2024) : збірник студентських наукових статей. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – Вип. 2. – С. 278-284.

5. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації. Збірник задач: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, Г.В. Пономарьова, А.О. Функендорф. Кривий Ріг: КК НАУ. 2018. 332 с.

6. Аргунов М. О. Розроблення підсистеми обліку комплектуючих у комп'ютерно-інтегрованому технологічному процесі : пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / М. О. Аргунов ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки – Харків, 2022. – 82 с.

7. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Максимова С.С. ВЕАМ робототехніка: Навчальний посібник. – Oktan Print – Prague.: 2024.- 276 с.

8. Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for Cyber-Physical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10), 7465-7473.

9. Романов, Я. С. Забезпечення точності контурного фрезерування на верстатах з ЧПК : магістерська дис. : 131 Прикладна механіка, Технологія машинобудування / Романов Ян Сергійович. – Київ, 2024. – 117 с.

10. Dunn William C. *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. McGraw-Hill Book Co, 2018. 336 p. URL: <https://www.ebooks.com/en-us/book/96278766/fundamentals-of-industrial-instrumentation-and-process-control-2e-pb/william-c-dunn/>.

11. Кишенько В. Д. Сучасні методи та моделі інтелектуальних систем керування. Київ: НУХТ, 2021. 252 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/1YHidYjIMnPl6Exx58-lg4j7vYzYc0As3/view>.

12. Nevliudov I. Evolutions Of Group Management Development Of Mobile Robotic Platforms In Warehousing 4.0. / I. Nevliudov et al. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2021. № 4 (18). P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.057>.

13. Yevsieiev V. Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support / V. Yevsieiev et al. *Applied Mathematics & Information Sciences An International Journal*. 2023. Vol. 17, No. 6. P. 1073–1088. DOI: <https://doi.org/10.18576/amis/170615>.

14. Єремєєв І. С., Кисельов В. Б. Автоматизовані системи управління технологічними процесами. Київ: Гельветика, 2022. 324 с. URL:

https://knushop.com.ua/faculty/kibernetyka?product_id=2317&sort=p.model&order=ASC.

15. Zheng, T., Ardolino, M., Vacchetti, A., & Perona, M. (2021). The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 59(6), 1922-1954.

16. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навч. посіб. для студентів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. - Харків: Панов А.М., 2020. – 240 с.

17. Python // Python, 2024. URL: <https://www.python.org/> (дата звернення: 10.12.2024).

18. Євсєєв В.В. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi и мови Python 3.6) // Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В. Підручник. – Харків : 2020. С. 257.

19. Охорона праці на виробництві // Сайт ГСС, 2024. URL: <https://gc.ua/uk/oxorona-pracivofisivimogidorobochogomiscyaofisnogopracivnika/> (дата звернення: 10.12.2024).

20. Невлюдов І.Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: підручник. Харків: ФОП Панов А.М., 2021. – 604 с.

21. Ціль 9. Промисловість, інновації та інфраструктура // Diia business, 2024. URL: https://business.diia.gov.ua/entrepreneur-handbook/item/cil_9_promislovist_innovaciyi_ta_infrastruktura (дата звернення: 18.12.2024).