

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Автоматизація процесу сортування товарів на конвеєрі за допомогою
комп'ютерного зору
Назва теми

Рівень вищої освіти Перший (бакалаврський)
Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ
Шифр

Виконала студентка 4 курсу, група АКІТ-22-1
Шифр


Підпис

Вікторія КРИВКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник канд. техн. наук, доц.
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер канд. техн. наук, доц.
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Галина РАДЕЛЬЧУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки


Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

10.06.2026
Дата

Хмельницький 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Інформаційних технологій
Кафедра Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТтаР

Людмила КОРЕЦЬКА 

07 лютого 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Кривко Вікторії Сергіївні
Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи «Автоматизація процесу сортування товарів на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору»

Керівник роботи Корецька Людмила Олександрівна, канд. техн. наук, доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.06.2026 р.

3 Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики

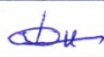
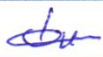
4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Огляд та аналіз існуючих рішень, методів автоматизації систем процесу сортування товарів на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору, розробка автоматизованої системи сортування товарів на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору, проектування автоматизованої системи товарів на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору, програмно-алгоритмічне забезпечення автоматизованої системи товарів на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М. В., доцент кафедри АКИТтаР		
Нормоконтроль	Радельчук Г. І., доцент кафедри АКИТтаР		

7 Дата видачі завдання 07 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студентка

Підпис

Вікторія КРИВКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація процесу сортування товарів на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору».

Автор роботи: Кривко Вікторія Сергіївна.

Керівник роботи: Корецька Людмила Олександрівна.

Пояснювальна записка: 64 с., 17 рис., 2 табл., 40 джерел.

Графічна частина: 15 презентаційних слайдів.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КЕРУВАННЯ СОРТУВАННЯМ, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР,
КОНВЕЄР, СОРТУВАННЯ.

Мета кваліфікаційної роботи розробка автоматизованої системи керування сортуванням товарів на конвеєрній лінії з використанням технологій комп'ютерного зору.

Використання технологій комп'ютерного зору дозволяє автоматизувати процес розпізнавання об'єктів за складними критеріями: колір, форма, розмір, наявність дефектів, що значно зменшує вплив людського фактора, знижує відсоток браку та підвищує загальну продуктивність конвеєрних ліній. Саме тому розробка автоматизованої системи сортування товарів на базі комп'ютерного зору є вельми актуальною науково-практичною задачею.



Підпис студента



Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ СОРТУВАННЯМ ТОВАРІВ НА КОНВЕЄРНІЙ ЛІНІЇ	9
1.1 Загальні відомості про процес автоматизації керування сортуванням товарів на конвеєрній лінії	9
1.2 Огляд методів та алгоритмів комп'ютерного зору для перевірки продукції	13
1.3 Аналіз існуючих технічних та програмних рішень для автоматизованого сортування товарів на конвеєрній лінії	18
1.4 Постановка задачі на проектування системи автоматизації процесу сортування цукерок на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору.....	21
1.5 Висновки до першого розділу.....	22
2 ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СОРТУВАННЯ ЦУКЕРОК НА КОНВЕЄРІ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ	24
2.1 Розробка структурної схеми автоматизованої системи сортування цукерок на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору	24
2.2 Вибір апаратних та програмних засобів автоматизованої системи сортування цукерок на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору.....	26
2.2.1 Обчислювальний модуль NVIDIA Jetson Orin Nano 8GB	30
2.2.2 ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C.....	33
2.2.3 Промислова цифрова відеокамера Basler ace 2 a2B1920-30gm	35
2.2.4 Оптичний об'єктив з C-mount кріпленням Computar 2/3" 16mm.....	36
2.2.5 Джерело безвідблискового підсвічування CCS LDM2-90 White	37
2.2.6 Оптичний датчик детектування об'єктів Omron E3Z-D61	38
2.2.7 Швидкодійний електромагнітний клапан Festo MHE2-MS1H	40

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація процесу сортування на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Кривко В. С.		02.06.26					
Перевір.		Корецька Л.О.		10.06.26			4	64	
Реценз.						ХНУ, АКІТ-22-1			
Н. Контр.		Радельчук Г. І.		10.06.2026					
Затверд.		Корецька Л. О.		10.06.2026					

2.3 Висновки до другого розділу	42
3 ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СОРТУВАННЯ ЦУКЕРОК НА КОНВЕЄРІ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ	44
3.1 Алгоритм функціонування автоматизованої системи сортування цукерок на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору	44
3.2 Проектування програмного забезпечення автоматизованої системи сортування цукерок на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору	50
3.3. Реалізація програмного забезпечення для автоматизованої системи сортування на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору	55
3.4 Висновки до третього розділу	56
ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	61

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

КЗ – комп’ютерний зір

РНТ – розпізнавання надрукованого тексту

ПЛК – програмований логічний контролер

ОС – операційна система

ІІ – штучний інтелект

BGR (Blue, Green, Red) – базова колірна модель у бібліотеці OpenCV

CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник (технологія побудови світлочутливих матриць камер)

FPS (Frames Per Second) – кількість кадрів на секунду

GPIO (General-Purpose Input/Output) — інтерфейс вводу/виводу загального призначення

GUI (Graphical User Interface) – графічний інтерфейс користувача

MES (Manufacturing Execution System) – система управління виробничими процесами

NPN (Negative-Positive-Negative) – тип транзисторного виходу промислового датчика

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) – бібліотека алгоритмів комп’ютерного зору з відкритим вихідним кодом

					<i>КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості та логістики підвищення ефективності виробничих процесів є критично важливим завданням. Одним із ключових етапів багатьох виробництв є сортування та контроль якості продукції. Традиційні методи, що базуються на ручній праці або найпростіших оптичних датчиках, часто не здатні забезпечити необхідну швидкість, точність та гнучкість. Використання технологій комп'ютерного зору (Computer Vision) дозволяє автоматизувати процес розпізнавання об'єктів за складними критеріями: колір, форма, розмір, наявність дефектів, що значно зменшує вплив людського фактора, знижує відсоток браку та підвищує загальну продуктивність конвеєрних ліній. Саме тому розробка автоматизованої системи сортування товарів на базі комп'ютерного зору є вельми актуальною науково-практичною задачею.

Системи обробки зору, або комп'ютерний зір – це галузь штучного інтелекту, що дозволяє комп'ютерам «бачити» та інтерпретувати візуальну інформацію з реального світу. Ці системи використовують алгоритми та моделі для аналізу зображень і відео, вилучення з них значущої інформації та прийняття рішень на її основі. Це як навчити комп'ютер розуміти світ так, як це робить людина за допомогою очей, але з надзвичайною точністю та швидкістю.

Технологія комп'ютерного зору – це галузь штучного інтелекту, яка дозволяє комп'ютерам та системам отримувати значущу інформацію з цифрових зображень, відео та інших візуальних даних. Потім моделі діють або надають рекомендації на основі того, що вони дізнаються з вхідних даних.

Комп'ютерний зір є одним з найважливіших сенсорних модальностей для сучасної робототехніки, дозволяючи роботам «бачити» і взаємодіяти з навколишнім світом. Інтеграція систем розпізнавання зору в робототехнічні платформи трансформує їхні можливості, перетворюючи їх зі сліпих виконавців на автономних та інтелектуальних помічників.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи керування сортуванням товарів на конвеєрній лінії з використанням технологій комп'ютерного зору.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів та систем автоматизованого сортування на виробництві;
- виконати вибір апаратного забезпечення: обчислювального ядра, системи технічного зору, датчиків та виконавчих механізмів;
- розробити структурну схему автоматизації процесу;
- обрати та налаштувати алгоритми комп'ютерного зору для розпізнавання та класифікації об'єктів;
- розробити програмне забезпечення для логічного керування сортувальним механізмом.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого сортування товарів на конвеєрній лінії.

Предмет дослідження – апаратно-програмні засоби та алгоритми комп'ютерного зору, що застосовуються для розпізнавання та класифікації товарів у реальному часі.

Розроблена система може бути інтегрована в існуючі конвеєрні лінії на підприємствах логістичної, харчової або приладобудівної галузей. Запропоновані апаратно-програмні рішення дозволяють швидко переналагоджувати систему під нові типи товарів, що робить її гнучким та універсальним інструментом для сучасного виробництва.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ СОРТУВАННЯМ ТОВАРІВ НА КОНВЕЄРНІЙ ЛІНІЇ

1.1. Загальні відомості про процес автоматизації керування сортуванням товарів на конвеєрній лінії

Сучасне промислове виробництво та логістика вимагають безперервного підвищення продуктивності та точності виконання технологічних операцій. Одним із найбільш критичних та трудомістких етапів є розподіл та класифікація готової продукції на транспортерних стрічках. Автоматизація керування цим процесом дозволяє повністю або частково виключити людський фактор, мінімізувати кількість помилок під час сортування, знизити експлуатаційні витрати та суттєво підвищити пропускну здатність конвеєрних ліній.

У загальному вигляді автоматизований процес сортування являє собою динамічну систему, де об'єкти рухаються з певною швидкістю, а керуючий комплекс повинен у режимі реального часу приймати рішення щодо зміни траєкторії руху кожного окремого виробу. Функціонування такої системи базується на циклічному виконанні трьох основних етапів: детектування та зчитування параметрів об'єкта, логічна обробка отриманих даних обчислювальним ядром, а також фізична дія на об'єкт за допомогою виконавчих механізмів.

Інформаційне забезпечення процесу відіграє першочергову роль, оскільки точність сортування прямо залежить від якості первинних даних. Якщо раніше для цього використовувалися прості оптичні або індуктивні датчики, що фіксували лише наявність або габарити предмета, то сучасний етап розвитку автоматизації передбачає впровадження систем комп'ютерного зору. Відеокамери високої роздільної здатності фіксують повний спектр візуальних характеристик товару, що дозволяє аналізувати складні параметри, такі як цілісність форми, текстура, відповідність колірній гамі чи наявність дрібних дефектів поверхні.

Обчислювальна логіка системи реалізується на базі програмованих логічних контролерів або промислових комп'ютерів. Головне завдання цього рівня полягає

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у координації часових інтервалів. Система повинна чітко співвідносити просторове положення рухомого об'єкта зі швидкістю конвеєрної стрічки. Обчислювальний блок розраховує точний момент часу, коли розпізнаний товар порівнюється із зоною відгалуження чи скидання, і формує команду на спрацювання відповідного приводу.

Виконавчий підкомплекс завершує технологічний цикл автоматичного сортування. Залежно від маси, крихкості та швидкості руху товарів застосовуються різні типи приводів, серед яких найбільшого поширення набули пневматичні штовхачі, повітряні сопла, поворотні напрямні лопатки або електроприводи. Належний рівень автоматизації гарантує, що механічний вплив на виріб буде делікатним та точним, запобігаючи пошкодженню товарного вигляду продукції.

Таким чином, автоматизація керування сортуванням на конвеєрі перетворює ізольовану транспортну операцію на інтелектуальну підсистему загального виробничого комплексу. Це створює підґрунтя для збору детальної статистики про якість продукції, ведення обліку в реальному часі та гнучкого переналагодження лінії під нові типи товарів без зупинки основного конвеєра.

Загалом об'єкти сортування можуть бути абсолютно різними. У промисловому виробництві, наприклад, деталі та запчастини, що є класичною інженерною задачею, де комп'ютерний зір перевіряє вироби, що сходять з конвеєра. Тут сортуються металеві або пластикові деталі, наприклад, шестерні, болти, кришки за формою, розміром або наявністю браку (тріщини, подряпини, відсутність потрібного отвору). Особливістю є те, що таке сортування вимагає високої точності та швидкості, і тут використовуються промислові камери та алгоритми пошуку контурів.

У харчовій промисловості та агросекторі сортуються фрукти або овочі (яблука, помідори, картопля), печиво, цукерки за кольором (стигле/нестигле), за розміром (калібрування), за наявністю дефектів (гнилизна, вм'ятини). Особливістю є те, що тут часто застосовують машинне навчання, наприклад, нейромережі типу YOLO, щоб навчити систему розпізнавати «хворі» ділянки на яблуці (рисунки 1.1).

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

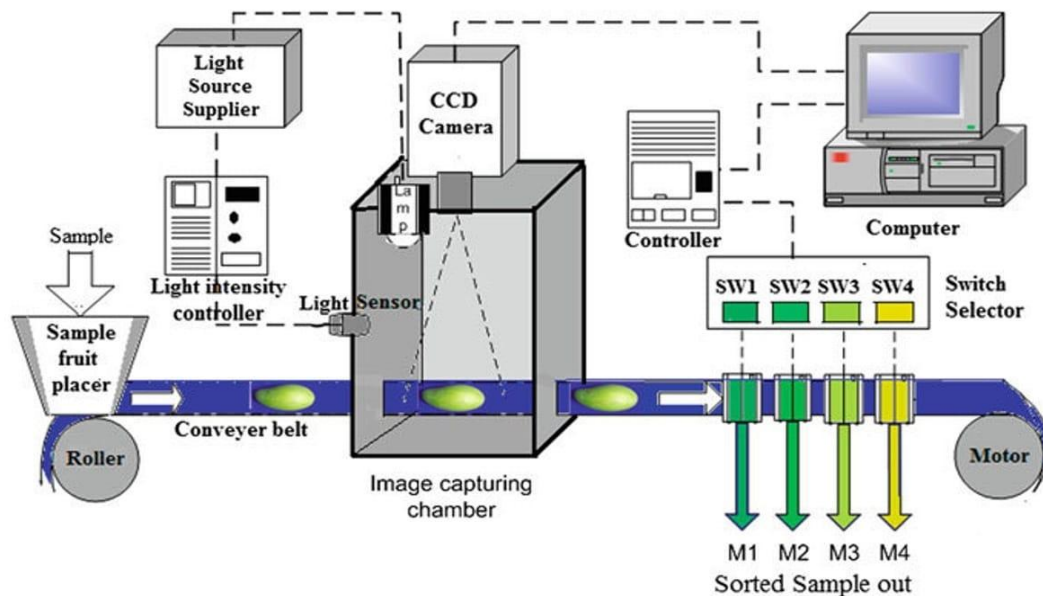


Рисунок 1.1 – Сортвання фруктів (манго) [1]

Складська логістика та E-commerce ідеально підходить для сучасних реалій інтернет-торгівлі та поштових операторів, де сортуються посилки, коробки, конверти за якими критеріями: зчитування штрих-кодів, QR-кодів, розпізнавання надрукованого тексту (OCR), оцінка габаритів коробки для розподілу по різних лініях. Особливістю є акцент на швидке зчитування даних у русі та зв'язок з базами даних (SQL).

При переробці відходів (Recycling) сортується побутове сміття на стрічці (пластикові пляшки, скло, картон, алюмінієві банки) за типом матеріалу та формою. Це найскладніша задача для комп'ютерного зору, оскільки об'єкти деформовані (зім'яті пляшки), тому тут обов'язково потрібен штучний інтелект.

Фармацевтика надзвичайно вимоглива до якості галузь, де сортуються блістери з таблетками або флакони за такими критеріями: контроль цілісності упаковки, перевірка наявності всіх таблеток у блістері, правильність наклеєної етикетки. Особливістю є фокус на ідеальному освітленні конвеєра, щоб уникнути відблисків від фольги чи скла (рисунок 1.2).

В рамках даної кваліфікаційної роботи буде розроблятися системи, що займатиметься сортуванням цукерок. Кондитерська промисловість характеризується високими швидкостями виробництва та суворими вимогами до якості готової продукції. Традиційно контроль якості цукерок, а саме цілісність форми, наявність обгортки, правильність кольору здійснювався візуально операторами-контролерами. Проте ручна праця на конвеєрних лініях має ряд суттєвих недоліків: швидка втомлюваність персоналу, суб'єктивність оцінки та неможливість підтримувати високий темп роботи понад 200-300 одиниць за хвилину.

Впровадження найпростіших засобів автоматизації, таких як фотоелектричні або індуктивні датчики, вирішує лише частину проблем, наприклад, підрахунок кількості. Для комплексного аналізу якості цукерок сучасні виробництва переходять на системи технічного зору (Machine Vision). Вони дозволяють безконтактно, у режимі реального часу аналізувати кожен виріб на конвеєрі за безліччю критеріїв одночасно, що мінімізує потрапляння бракованої продукції до споживача.

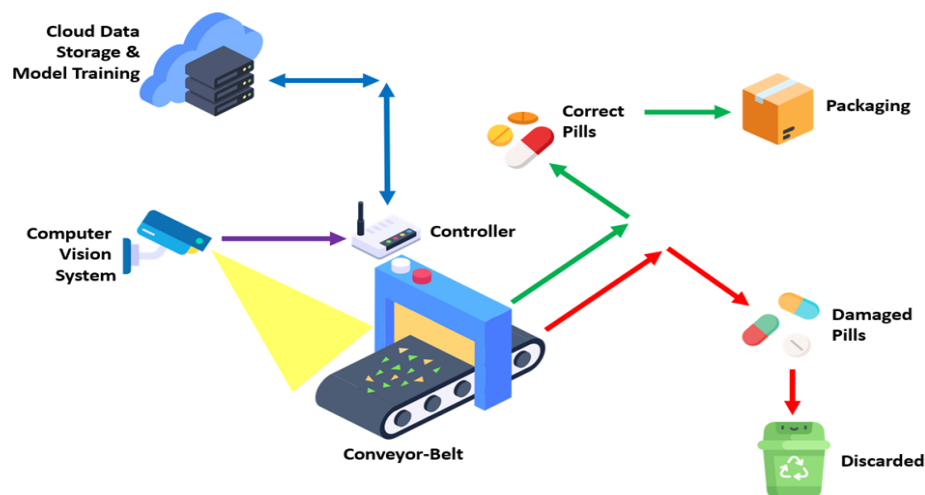


Рисунок 1.2 – Сортування в фармацевтиці [2]

1.2. Огляд методів та алгоритмів комп'ютерного зору для перевірки продукції

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Ефективність функціонування автоматизованої системи сортування шоколадних виробів безпосередньо залежить від математичного та алгоритмічного забезпечення, яке використовується для обробки та аналізу візуальних даних. У задачах промислової дефектоскопії кондитерської продукції алгоритми комп'ютерного зору повинні працювати в умовах суворих часових обмежень, забезпечуючи високу точність розпізнавання за умов динамічної зміни зовнішніх факторів, таких як коливання освітленості або незначні зміщення об'єктів на конвеєрній стрічці. Сучасний науково-технічний арсенал комп'ютерного зору в цій галузі можна розділити на класичні методи цифрової обробки зображень та сучасні підходи на основі машинного навчання.

Для вирішення задач сортування цукерок найчастіше застосовуються такі методи комп'ютерного зору:

- колірна сегментація (Color Thresholding);
- аналіз контурів та форм (Blob Analysis / Edge Detection);
- співставлення з еталоном (Template Matching);
- машинне навчання (Machine Learning).

Колірна сегментація використовується для сортування цукерок, наприклад, драже чи льодяників за кольором. Зазвичай зображення переводиться з колірного простору RGB у простір HSV (Hue, Saturation, Value), оскільки він є більш стійким до змін освітлення на конвеєрі. Будь-який алгоритм аналізу починається з етапу попередньої обробки, метою якого є зниження рівня шумів та виділення корисного сигналу. Для шоколадних цукерок, які мають глянцеvu або рельєфну поверхню, критично важливим є нівелювання оптичних відблисків. На початковому етапі зазвичай застосовують лінійну та нелінійну фільтрацію, зокрема медіанний фільтр, який ефективно усуває імпульсні шуми (ефект «сіль та перець»), не розмиваючи при цьому чіткі межі самого виробу.

Наступним кроком є перехід від стандартного колірного простору RGB до більш стабільних моделей, серед яких найчастіше обирають простір HSV або LAB. Простір RGB є сильно залежним від інтенсивності освітлення, оскільки зміна

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

яскравості лампи пропорційно змінює значення всіх трьох каналів (червоного, зеленого та синього). У моделі HSV інформація про колірний тон відокремлена від яскравості, що дозволяє системі стабільно розпізнавати колір шоколадної глазури або елементів обгортки навіть при природному згасанні чи посиленні штучного світла в цеху.

Після колірної трансформації виконується бінаризація зображення, тобто перетворення його у двоколірний (чорно-білий) формат для відокремлення об'єкта від фону конвеєрної стрічки. Для автоматизації цього процесу застосовують метод Оцу (Otsu's thresholding), який самостійно розраховує оптимальний поріг яскравості на основі аналізу гістограми зображення, мінімізуючи дисперсію всередині виділених класів пікселів. Це дозволяє отримати чіткий бінарний силует цукерки для подальшого аналізу геометричних параметрів.

Аналіз контурів та форм дозволяє визначити геометричні центри об'єктів, їхню площу та периметр. Алгоритми, наприклад, детектор граней Кенні – Canny Edge Detector допомагають виявити цукерки зі сколами, злиплі вироби або деформовані одиниці.

Для визначення структурних дефектів, таких як відламані шматки шоколаду, тріщини або злипання кількох цукерок між собою, застосовують методи морфологічного аналізу та детектування контурів. Після бінаризації на зображенні можуть залишатися дрібні артефакти або поодинокі пікселі-шуми. Для їх усунення використовують операції математичної морфології, а саме ерозію (звуження) та дилатацію (розширення). Послідовне застосування цих операцій у вигляді морфологічного відкриття дозволяє видалити дрібний бруд із фону, а морфологічне закриття допомагає загладити контури об'єкта та заповнити випадкові внутрішні порожнечі в силуеті цукерки.

Виділення контурів зазвичай реалізують за допомогою детектора граней Кенні (Canny Edge Detector). Цей алгоритм обчислює градієнт яскравості зображення і знаходить локальні максимуми, що відповідають реальним межах виробу. Отриманий контур дозволяє математично описати геометрію цукерки

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

через обчислення її просторових моментів (моментів X_u). Завдяки цьому система розраховує площу об'єкта, його периметр, довжину головних осей та коефіцієнт округлості. Порівняння реальної площі та форми виявленого контуру з еталонними значеннями дає змогу миттєво ідентифікувати цукерки з механічними пошкодженнями або вироби нестандартного розміру.

Співставлення з еталоном є методом, при якому отримане зображення цукерки порівнюється з ідеально заданим шаблоном. Використовується для перевірки правильності нанесення малюнка або логотипа на шоколадних виробах. Якщо технічне завдання вимагає контролю наявності відтиснутого логотипа на поверхні шоколаду або правильного позиціонування малюнка обгортки, класичної сегментації недостатньо. У таких випадках застосовують алгоритм зіставлення з шаблоном (Template Matching). Програма сканує зображення конвеєра за допомогою матриці-шаблону і обчислює коефіцієнт взаємної кореляції для кожної позиції. Локальний максимум кореляції вказує на точне просторове положення шуканого елемента, а якщо пікове значення виявляється нижчим за встановлений поріг, система фіксує брак через відсутність або деформацію фірмового знака.

Для виявлення специфічних дефектів глазури, таких як сітка дрібних тріщин або неоднорідність покриття, ефективно використовувати методи текстурного аналізу. Одним із таких підходів є побудова матриці суміжності рівнів сірого кольору (GLCM). Цей метод аналізує просторовий розподіл яскравості пікселів та обчислює такі статистичні метрики, як контраст, однорідність, ентропія та енергія текстури. Гладка поверхня якісного шоколаду матиме низький рівень контрасту та високу однорідність, тоді як поява тріщин чи подряпин різко змінить ці показники, що є сигналом для спрацьовування виконавчого механізму відбракування.

У складніших випадках, наприклад, для виявлення складок на обгортці або нестандартних дефектів, застосовуються згорткові нейронні мережі (CNN), які навчаються на великих датасетах «правильних» та «бракованих» цукерок.

Класичні методи обробки зображень демонструють високу швидкість роботи, проте вони мають суттєвий недолік – низьку гнучкість при виявленні

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

непрямих або нелінійних дефектів, наприклад, коли форма браку є унікальною для кожного виробу (пом'ята обгортка, витікання начинки, нестандартні напливи шоколаду). Для вирішення таких складних завдань сучасні системи автоматизації інтегрують згорткові нейронні мережі (CNN).

Найбільш перспективними для конвеєрних ліній є архітектури нейромереж сімейства YOLO (You Only Look Once) або Single Shot MultiBox Detector (SSD). Головна перевага цих моделей полягає в тому, що вони виконують детектування та класифікацію об'єктів за один прохід через мережу, забезпечуючи швидкість обробки на рівні 30-60 кадрів за секунду навіть на мобільних обчислювальних платформах.

Нейромережа попередньо навчається на великій вибірці зображень, де маркуються різні класи виробів: «придатна цукерка», «дефект форми», «пошкоджена обгортка». У процесі навчання мережа самостійно виділяє складні комбінації ознак, які важко описати математичними формулами у класичних алгоритмах. Недоліком використання штучного інтелекту є необхідність значних обчислювальних ресурсів на етапі навчання та залежність якості розпізнавання від повноти навчальної вибірки, проте цей підхід гарантує найвищий рівень адаптивності системи до нових видів продукції.

Оскільки реальний брак шоколадних цукерок може бути як геометричним (сколи), так і текстурним (пом'ята фольга), найбільш доцільним є проектування комбінованої системи.

Для простих операцій (визначення позиції цукерки та її площі) ми задіємо швидкий контурний аналіз, а для фінальної класифікації складних дефектів – полегшену нейромережу типу YOLO. Такий гібридний підхід дозволить отримати максимум точності при збереженні високої швидкості роботи конвеєра. Порівняння розглянутих методів показано у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння існуючих методів інспекції продукції

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метод комп'ютерного зору	Основні переваги	Головні недоліки	Обчислювальна складність	Ефективність для шоколадних цукерок
Колірна сегментація (HSV + метод Оцу)	Найвища швидкість обробки кадрів; простота програмної реалізації; стійкість до коливань загальної яскравості освітлення.	Висока чутливість до дзеркальних відблисків на глянцевої глазури; абсолютно не враховує геометрію та форму об'єкта.	Низька (миттєве виконання на будь-яких ПЛК або мікроконтролерах)	Ідеально підходить для базового відокремлення цукерки від конвеєрної стрічки та визначення кольору обгортки.
Контурний та морфологічний аналіз (Canny, моменти Hu)	Точне математичне вимірювання геометричних параметрів (площа, периметр); робота в реальному часі без GPU.	Чутливість до бруду або крихт на конвеєрі; складно описати дефекти, що не мають чіткої геометричної форми.	Низька / Середня (залежить від роздільної здатності камери)	Ефективний для пошуку відламаних шматків шоколаду, сколів глазури, а також виявлення злиплих між собою цукерок.

Кінець таблиці 1.1

Зіставлення з еталоном (Template Matching)	Висока точність при перевірці статичних, жорстко заданих елементів та написів; мінімум налаштувань.	Алгоритм втрачає точність при повороті цукерки на стрічці або зміні масштабу; не здатний виявляти нестандартні деформації.	Середня (пропорційна розміру шаблону та області пошуку)	Застосовується для контролю наявності та правильності відтиску фірмового логотипа на верхній грані шоколаду.
Згорткові нейромережі (Deep Learning / YOLO)	Максимальна гнучкість; здатність розпізнавати унікальні дефекти, які неможливо описати формулами; висока адаптивність.	Необхідність збору та маркування сотень або тисяч зображень для навчання; високі вимоги до апаратного забезпечення.	Висока (вимагає наявності графічного процесора GPU або нейропроцесора NPU)	Використовується для комплексного аналізу: виявлення пом'ятої чи розірваної обгортки, витікання рідкої начинки, напливів шоколаду.

1.3. Аналіз існуючих технічних та програмних рішень для автоматизованого сортування

Для обґрунтування розробки власної системи автоматизації необхідно провести детальний аналіз існуючих на світовому та вітчизняному ринках технологічних рішень у сфері машинного зору. Сучасні промислові системи сортування та дефектоскопії кондитерських виробів можна розділити на три основні категорії, кожна з яких має свою специфіку архітектури, технічні обмеження та фінансову доцільність впровадження:

- промислові смарт-камери (моноблочні рішення);

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

- системи на базі промислових ПК та спеціалізованого ПЗ;
- відкриті вбудовані системи (Open-Source Embedded Systems).

Найбільш поширеним класичним рішенням для автоматизації конвеєрів є використання готових інтелектуальних смарт-камер від світових лідерів у галузі промислової автоматизації, таких як Cognex (серія In-Sight), Keyence або Sick. Концепція таких пристроїв полягає у принципі «все в одному», де в одному компактному корпусі з високим класом захисту (IP67) об'єднано матрицю камери, оптичний об'єктив, систему світлодіодного освітлення та спеціалізований мікропроцесор.

Програмне забезпечення таких камер є закритим (пропрієтарним) і налаштовується через графічний інтерфейс користувача без необхідності глибокого програмування. Системи від Cognex або Keyence демонструють надзвичайно високу надійність, стійкість до промислових завад і здатні працювати без збоїв роками.

Проте головним недоліком моноблочних рішень є їхня надзвичайно висока вартість, яка часто є неприйнятною для підприємств малого та середнього бізнесу. Крім того, закрита архітектура суттєво обмежує гнучкість системи: користувач не може самостійно інтегрувати сторонні алгоритми, змінити логіку обробки кадрів або додати сучасну нейромережу, якщо це не передбачено базовою ліцензією виробника, яка також потребує додаткової оплати.

Іншим підходом, що часто застосовується на великих підприємствах, є побудова розгалужених систем технічного зору на базі потужних промислових комп'ютерів (IPC), до яких через швидкісні інтерфейси GigE або Camera Link підключаються окремі цифрові камери. Математична обробка зображень у таких архітектурах реалізується за допомогою важких промислових програмних пакетів, таких як National Instruments LabVIEW (з модулем Vision Development Module) або Siemens SIMATIC MV.

Цей підхід дозволяє обробляти відеопотоки з кількох конвеєрних ліній одночасно та будувати складні багаторівневі системи керування (SCADA),

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтегровані в загальну структуру управління підприємством (ERP). Обчислювальна потужність ПК дає змогу реалізовувати алгоритми будь-якої складності.

Основним стримуючим фактором для впровадження таких комплексів є їхня громіздкість і складність проектування. Інтеграція вимагає високої кваліфікації інженерів, а вартість ліцензій на спеціалізоване програмне забезпечення (зокрема LabVIEW) у поєднанні з ціною промислового комп'ютера робить систему економічно виправданою лише для масштабних виробництв із мільйонними тиражами продукції.

Сучасним і найбільш динамічним трендом в автоматизації є створення кастомних систем технічного зору на базі відкритих архітектур. Такі рішення використовують доступні промислові або вбудовані мікрокомп'ютери, наприклад NVIDIA Jetson Nano або компактні одноплатні комп'ютери, що працюють під управлінням операційних систем сімейства Linux. Програмне забезпечення розробляється мовою Python із використанням безкоштовних бібліотек із відкритим вихідним кодом, таких як OpenCV, PyTorch або TensorFlow.

Головною перевагою цього підходу є абсолютна фінансова незалежність від ліцензійної політики розробників ПЗ та колосальна гнучкість. Інженер має повний контроль над кожним рядком коду, що дозволяє тонко налаштовувати алгоритми під специфічні дефекти шоколадних цукерок, оперативно змінювати критерії сортування та безкоштовно інтегрувати найсучасніші архітектури нейромереж типу YOLO. Завдяки широким комунікаційним можливостям, такі системи легко інтегруються з промисловими ПЛК через стандартні протоколи (Modbus TCP, OPC UA).

До недоліків відкритих рішень можна віднести підвищені вимоги до кваліфікації розробника в частині програмування, а також необхідність самостійного проектування корпусів та схем захисту електроніки від пилу та вологи кондитерського цеху. Проте, з точки зору співвідношення ціни, функціональності та адаптивності, цей напрямок є найбільш перспективним для розробки сучасних кваліфікаційних проектів.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Враховуючи проведені дослідження, для автоматизації процесу сортування шоколадних цукерок у даній роботі обрано третій підхід – проектування системи на базі відкритого програмного забезпечення (Python + OpenCV) та мікрокомп'ютерного обчислювального ядра. Це дозволить створити бюджетне, але водночас високоінтелектуальне рішення, здатне виконувати точну дефектоскопію складної форми шоколадних виробів без залучення дороговартісних закритих промислових платформ.

1.4 Постановка задачі на проектування системи автоматизації процесу сортування цукерок на конвеєрі

Зважаючи на проведений аналіз, у даній кваліфікаційній роботі ставиться задача розробити апаратно-програмний комплекс для автоматизації процесу сортування цукерок на стрічковому конвеєрі (рисунок 1.3).

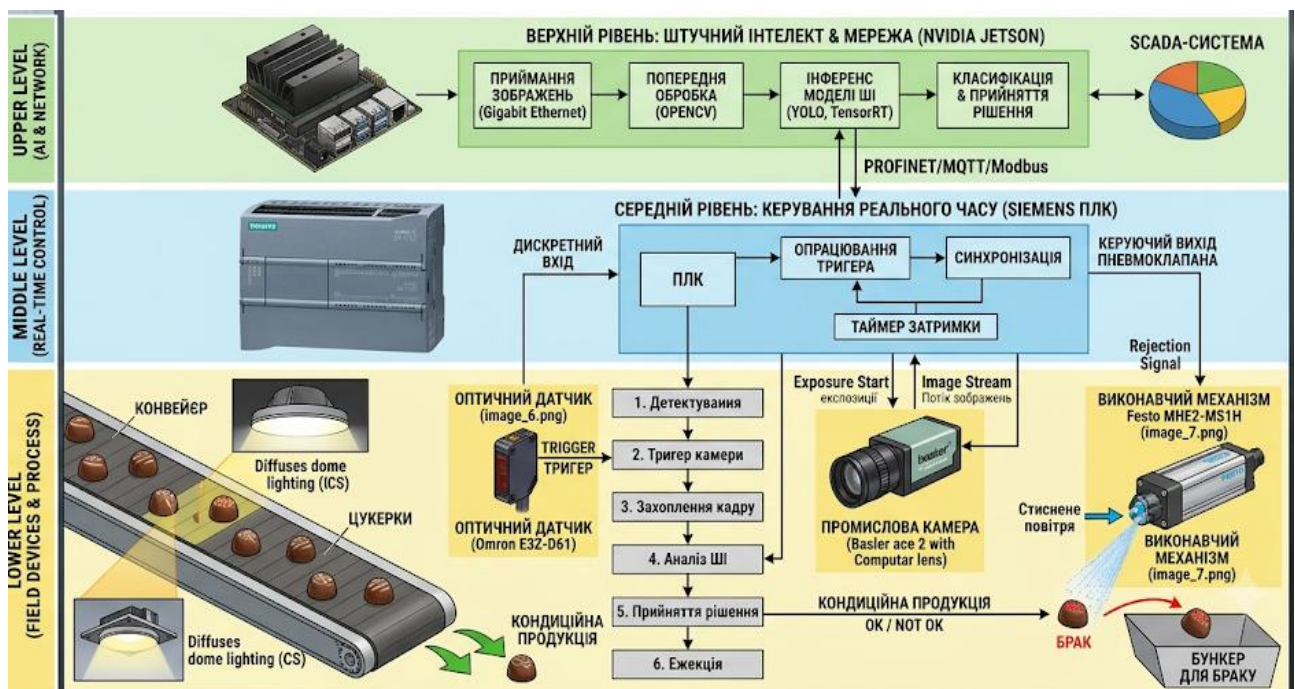


Рисунок 1.3 – Автоматизація процесу сортування цукерок на стрічковому конвеєрі

Система повинна забезпечувати:

- безперервне отримання відеопотоку з камери, встановленої над конвеєрною стрічкою;
- обробку зображень у реальному часі для ідентифікації кожної окремої цукерки;
- аналіз об'єкта за заданими критеріями (відповідність кольору та форми, відсутність дефектів);
- формування керуючого сигналу на виконавчий механізм, наприклад, пневматичний ежектор або пушер для видалення бракованої продукції або сортування за відповідними бункерами.

1.5 Висновки до першого розділу

Проведений аналіз сучасного стану автоматизації у кондитерській промисловості показав, що традиційні методи контролю якості шоколадних виробів, засновані на ручній праці або найпростіших дискретних датчиках, не здатні задовольнити сучасні вимоги до швидкодії, гнучкості та точності конвеєрних ліній. Впровадження систем технічного зору є найбільш перспективним та обґрунтованим кроком для забезпечення стовідсоткової дефектоскопії рухомої продукції в режимі реального часу, оскільки дозволяє безконтактно оцінювати комплекс візуальних параметрів кожної окремої цукерки.

Дослідження математичного та алгоритмічного забезпечення комп'ютерного зору дозволило детально порівняти класичні методи цифрової обробки зображень із сучасними підходами на основі глибокого машинного навчання. Завдяки цьому аналізу було встановлено, що для оптимізації обчислювальних витрат та досягнення максимальної точності розпізнавання доцільно використовувати гібридний підхід. У такій структурі класичні алгоритми колірної сегментації в просторі HSV та контурного аналізу відповідатимуть за миттєве детектування просторового положення і площі цукерки, тоді як полегшені згорткові нейронні

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мережі сімейства YOLO задіюватимуться для класифікації складних нелінійних дефектів, таких як деформація форми, пошкодження обгортки чи напливи глазурі.

Аналіз існуючих на ринку технічних рішень виявив суттєві обмеження готових промислових смарт-камер та важких програмних комплексів на базі промислових комп'ютерів, що полягають у їхній надмірній вартості, закритій архітектурі та неможливості гнучкої інтеграції сторонніх алгоритмів. Як найбільш раціональну альтернативу для розробки було обґрунтовано впровадження відкритої вбудованої системи на базі мови програмування Python, бібліотек OpenCV і PyTorch, а також мікрокомп'ютерного обчислювального ядра. Таке рішення забезпечує повний контроль над програмним кодом, високу адаптивність до зміни асортименту продукції та фінансову доступність, що закладає надійний теоретичний фундамент для розробки конкретної апаратно-програмної структури.

					<i>КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ</i>	Арк.
						23
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СОРТУВАННЯ ТОВАРУ НА КОНВЕЄРІ

2.1 Розробка структурної схеми системи автоматизації процесу сортування цукерок на конвеєрі

Структурна схема автоматизації є фундаментальною основою для всього подальшого проектування апаратного комплексу, оскільки вона визначає чітку ієрархію взаємодії, топологію зв'язків та розподіл функцій між усіма технічними засобами системи. Для забезпечення надійної інспекції шоколадних цукерок у реальному часі на високошвидкісному конвеєрі традиційні однорівневі архітектури є неефективними. Обробка складних відеоданих та миттєве формування фізичних управляючих сигналів вимагають побудови децентралізованої трирівневої структури керування, яка дозволяє розділити важкі математичні обчислення та жорсткі часові задачі таймінгу.

Нижній рівень системи здійснює безпосередню фізичну взаємодію з технологічним процесом транспортування продукції. До його складу входить первинний дифузний фотоелектричний датчик, який фіксує геометричний факт появи цукерки на визначеній ділянці стрічки. Оптичну інформацію формує тандем із промислової цифрової відеокамери та спеціалізованого купольного світлодіодного підсвічування, яке повністю нівелює дзеркальні відблиски від шоколадної глазури. Фінальну дію на об'єкт виконує виконавчий механізм польового рівня, представлений швидкісним електропневматичним клапаном повітряної форсунки, яка імпульсом стисненого повітря змінює траєкторію руху бракованого виробу.

Середній рівень системи, що є рівнем контролерного керування, функціонує в режимі жорсткого реального часу і виступає інтелектуальним мостом між інформаційними потоками та силовими приводами. Цей рівень реалізується на базі мікроконтролерного модуля або компактного програмованого логічного контролера. Його першочергове завдання полягає у високошвидкісному

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зчитуванні сигналів від фотоелектричного датчика та генерації апаратного імпульсу тригерування для камери, що забезпечує зйомку цукерки в одному й тому самому положенні кадру. Окрім цього, контролер приймає логічне рішення від верхнього обчислювального рівня, запускає внутрішній таймер затримки для компенсації відстані між камерою та форсункою і комутує релейний або транзисторний вихід для подачі напруги на котушку пневмоклапана.



Рисунок 2.1 – Структурна схема взаємодії рівнів автоматизації

Верхній рівень системи, або рівень обчислювального аналізу та диспетчеризації, базується на архітектурі високопродуктивного промислового комп'ютера або спеціалізованого обчислювального модуля. Він не бере участі в безпосередньому комутуванні датчиків, а повністю фокусується на програмній обробці цифрових кадрів, що надходять від камери через швидкісний інтерфейс. Тут розгортається основне програмне забезпечення системи технічного зору, функціонують класичні алгоритми фільтрації та навчена згорткова нейромережа. Верхній рівень приймає остаточне рішення щодо кондиційності цукерки та

передає дискретну команду на відбракування до середнього рівня через промисловий мережевий протокол. Крім того, цей рівень забезпечує збереження статистики та роботу людино-машинного інтерфейсу оператора конвеєра.

2.2 Вибір та обґрунтування апаратних та програмних засобів автоматизованої системи

Для успішного функціонування розробленої децентралізованої системи автоматизації необхідно чітко розділити обчислювальні потужності між аналітичними задачами верхнього рівня та критичними до часу задачами

На верхньому рівні для виконання ресурсомістких алгоритмів комп'ютерного зору та розгортання згорткової нейромережі YOLO обрано компактний обчислювальний модуль NVIDIA Jetson Orin Nano (версія на 8 ГБ оперативної пам'яті). Специфіка обробки відеопотоку з високою частотою кадрів унеможливорює використання класичних центральних процесорів (CPU) через їхню послідовну архітектуру. Модуль Jetson Orin Nano базується на архітектурі Ampere і містить 1024 ядра CUDA та 32 тензорних ядра, що забезпечує продуктивність штучного інтелекту до 40 TOPS.

Технічне обґрунтування вибору полягає у тому, що дана обчислювальна потужність дозволяє виконувати паралельну фільтрацію, бінаризацію кадру та одночасне детектування кількох об'єктів нейромережею з частотою понад 60 кадрів за секунду. Наявність апаратних інтерфейсів Gigabit Ethernet та USB 3.2 гарантує безперебійне захоплення кадрів високої роздільної здатності від промислових камер без втрати пакетів даних. Низьке енергоспоживання (до 15 Вт) та наявність розвиненої програмної екосистеми з підтримкою бібліотек OpenCV та TensorRT роблять цей модуль оптимальним вбудованим рішенням для кондитерського цеху.

Для реалізації управляючих алгоритмів реального часу, які безпосередньо взаємодіють із периферійним обладнанням, обрано промисловий програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200 (модифікація CPU 1212C

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

DC/DC/DC). Операційні системи загального призначення, які працюють на ПК чи модулях типу Jetson, схильні до мікрозатримок через планувальник завдань, що є неприпустимим при підрахунку мілісекунд руху цукерки конвеєром.

Контролер Siemens S7-1200 забезпечує детермінований час виконання циклу програми (менше 1 мілісекунди) та має апаратні транзисторні виходи, здатні миттєво комутувати струм для котушок електропневматичних клапанів. Наявність вбудованого інтерфейсу PROFINET (Ethernet) дозволяє організувати високошвидкісний обмін даними з модулем NVIDIA Jetson за протоколом Modbus TCP або OPC UA. Контролер приймає сигнал від датчика присутності, відраховує точний час затримки за допомогою внутрішніх високоточних таймерів і подає сигнал на спрацьовування форсунки точно в момент проходження бракованої цукерки повз зону скидання.

Компоненти оптичної підсистеми повинні забезпечувати отримання стабільного, чіткого та контрастного зображення цукерок незалежно від швидкості руху транспортера та зовнішнього освітлення цеху.

Як первинний сенсор системи технічного зору обрано цифрову промислову камеру Basler ace 2 (модель a2B1920-30gm) з інтерфейсом передачі даних Gigabit Ethernet. Головною особливістю цієї камери є використання CMOS-матриці Sony IMX392 з механізмом глобального затвора (Global Shutter). Звичайні побутові камери з Rolling Shutter фіксують рядки матриці послідовно, що при русі конвеєра призводить до геометричного спотворення форми цукерки (ефект «желе»). Global Shutter експонує всі пікселі одночасно, повністю виключаючи розмиття рухомого об'єкта. Камера має роздільну здатність 2.3 Мегапікселя (1920 на 1200 пікселів), що забезпечує високу деталізацію для пошуку дрібних тріщин глазури, а максимальна частота зйомки у 30 кадрів за секунду повністю покриває швидкісні потреби лінії.

Оптичний об'єктив та розрахунок фокусної відстані забезпечується камерою, яка комплектується промисловим об'єктивом із фіксованою фокусною відстанню та ручним регулюванням діафрагми Computar з серії 2/3". Для визначення точних параметрів оптичної системи проведеться геометричний розрахунок фокусної

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відстані, де в математичній залежності певна змінна позначає робочу відстань від об'єктива камери до поверхні конвеєрної стрічки, яка за конструктивними вимогами лінії становить 500 мм. Змінна h відображає фізичний розмір світлочутливої матриці камери по горизонталі, що для сенсора розміром дві третини дюйма дорівнює 8.8 мм. Змінна W визначає необхідну ширину поля зору (зону інспекції стрічки), яка встановлена на рівні 300 мм для повного охоплення конвеєра.

Враховуючи стандартний ряд фокусних відстаней промислових об'єктивів, обирається модель із найближчим фіксованим значенням 16 мм. Незначне звуження поля зору компенсується можливістю регулювання висоти підвісу камери в межах монтажного кронштейна.

Для усунення блукаючих дзеркальних відблисків від глянцевої поверхні шоколаду та блиску фольгованої обгортки обрано дифузне купольне джерело світла CCS серії LDM2-90 (білого спектра). Конструкція купольного освітлювача передбачає, що світлодіоди спрямовані на внутрішню матову поверхню півсфери, від якої світло відбивається і падає на цукерку під усіма можливими кутами одночасно. Це створює ефект безтіньового безвідблискового освітлення, де колір і текстура глазури виглядають однорідними, а дефекти форми та тріщини стають максимально контрастними для алгоритмів OpenCV.

Периферійне обладнання польового рівня відповідає за фізичну синхронізацію та безпосереднє виконання команди на відбракування некондиційного товару.

Для ініціації процесу зйомки в якості датчика присутності об'єкта обрано дифузний фотоелектричний датчик Omron E3Z-D61. На відміну від рефлекторних датчиків, він не потребує встановлення дзеркала з протилежного боку стрічки, оскільки приймач і випромінювач інфрачервоного світла об'єднані в одному корпусі, а сигнал відбивається безпосередньо від поверхні самої цукерки. Датчик має надзвичайно малий час відгуку (менше 1 мілісекунди) та вбудований потенціометр для точного налаштування чутливості, що дозволяє стабільно

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фіксувати проходження навіть темних шоколадних виробів на тлі світлої конвеєрної стрічки. Його дискретний вихід типу NPN підключається безпосередньо до швидкодіючого входу ПЛК Siemens.

Оскільки кондитерські вироби є крихкими і рухаються з високою щільністю, класичні механічні пушери (пнеumoциліндри) можуть пошкодити шоколад або не встигнути повернутися у вихідне положення при високій частоті браку. Тому як виконавчий механізм обрано систему імпульсного повітряного відбракування (пневмoeжектор). Вона складається з каліброваного повітряного сопла (форсунки), підключеного до промислової пневмомережі через високошвидкісний електромагнітний пневмоклапан Festo MHE2-MS1H.

Технічне обґрунтування вибору: Пневмоклапан серії MHE2 має унікальний час спрацьовування, який становить всього 2 мілісекунди, що дозволяє формувати надзвичайно короткі та точні імпульси стисненого повітря. Коли ПЛК подає напругу 24 В на котушку клапана, форсунка випускає потужний струмінь повітря, який делікатно здуває браковану цукерку з конвеєра у приймальний бункер, не торкаючись сусідніх придатних цукерок і не чинячи на них жодного механічного впливу.

У таблиці 2.1 продемонстровано порівняння обраних апаратних засобів.

Таблиця 2.1 – Порівняння обраних апаратних засобів

Рівень системи	Найменування компонента	Обрана модель пристрою	Ключовий параметр для системи сортування
Верхній	Обчислювальний модуль штучного інтелекту	NVIDIA Jetson Orin Nano 8GB	Продуктивність 40 TOPS для паралельного виконання YOLO

Кінець таблиці 2.1

Середній	Програмований логічний контролер (ПЛК)	Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C	Жорсткий реальний час, дискретні транзисторні виходи
----------	--	-----------------------------------	--

Нижній	Промислова цифрова відеокамера	Basler ace 2 a2B1920-30gm	Матриця з глобальним затвором (Global Shutter, 2.3 MP)
Нижній	Оптичний об'єктив з C-mount кріпленням	Computar 2/3" 16mm	Розрахункова фокусна відстань для поля зору 300 мм
Нижній	Джерело безвідблискового підсвічування	CCS LDM2-90 White	Купольна безтіньова конструкція для усунення відблисків
Нижній	Оптичний датчик детектування об'єктів	Omron E3Z-D61	Дифузне сканування з часом відгуку менше 1 мс
Нижній	Швидкодіючий електромагнітний клапан	Festo MHE2-MS1H	Час відкриття 2 мс для точного формування повітряного імпульсу

2.2.1 Обчислювальний модуль NVIDIA Jetson Orin Nano 8GB

Сучасні тенденції розвитку автоматизованих систем керування на транспортно-сортувальних лініях харчової промисловості вимагають радикального перегляду підходів до вибору обчислювальної архітектури. Традиційні промислові контролери, попри свою високу надійність у задачах дискретного керування, виявляються абсолютно неефективними, коли виникає потреба в обробці багатовимірних інформаційних потоків у режимі реального часу. Перехід від найпростішої фіксації наявності об'єкта до його комплексного візуального аналізу та дефектоскопії зумовлює необхідність інтеграції спеціалізованих обчислювальних платформ безпосередньо на периферійному рівні автоматизації.

У рамках розв'язання задачі високошвидкісного сортування шоколадної продукції ключовим елементом інформаційно-керуючої структури виступає обчислювальний модуль NVIDIA Jetson Orin Nano у модифікації з 8 ГБ оперативної пам'яті (рисунок 2.1). Цей пристрій бере на себе роль центрального інтелектуального ядра системи технічного зору, забезпечуючи безперервний та високоточний аналіз геометричних і текстурних параметрів виробів, що рухаються конвеєрною стрічкою. Завдяки високій щільності інтеграції компонентів, такий

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модуль дозволяє реалізувати концепцію периферійних обчислень, коли первинна фільтрація, контурний аналіз та класифікація дефектів відбуваються безпосередньо біля технологічного агрегату, мінімізуючи затримки на передачу даних мережевими каналами.



Рисунок 2.1 – NVIDIA Jetson Orin Nano

Технічна доцільність використання платформи NVIDIA Jetson Orin Nano зумовлена її унікальною гетерогенною архітектурою, яка кардинально відрізняється від класичних послідовних процесорних систем. Наявність 1024 обчислювальних ядер CUDA, побудованих на базі архітектури Ampere, дозволяє виконувати масивні матричні операції над цифровими зображеннями паралельно. Коли від промислової камери через інтерфейс Gigabit Ethernet надходить кадр високої роздільної здатності, графічний сопроцесор розподіляє масив пікселів між сотнями потоків, забезпечуючи миттєву попередню обробку. Це дозволяє без затримок реалізувати такі алгоритми, як просторова фільтрація для усунення цифрових шумів, колірна трансформація вихідного простору в модель HSV та автоматична порогова бінаризація за методом Оцу.

Особливу цінність для побудови адаптивних систем автоматизації становлять 32 спеціалізовані тензорні ядра, інтегровані в структуру процесора. Вони орієнтовані на виконання низькоточних математичних операцій зі змішаною точністю, які є базовими для функціонування штучних нейронних мереж. Завдяки такій апаратній підтримці, розгорнута в системі згорткова нейромережа типу YOLO здатна здійснювати детектування та класифікацію складних дефектів форми

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та обгортки цукерок із частотою, що значно перевищує динамічні характеристики конвеєрної лінії. Програма оперує не поодинокими ознаками, а складними комбінаціями візуальних критеріїв, що дозволяє стабільно виявляти нелінійні пошкодження глазури, тріщини або напливи шоколаду.

Ефективність використання восьмигігабайтної версії модуля Jetson Orin Nano суттєво підвищується завдяки застосуванню спеціалізованого програмного інструментарію оптимізації нейромережових моделей. Використання бібліотеки TensorRT дозволяє трансформувати навчену в середовищі PyTorch нейромережу у високоефективний виконуваний код, адаптований під конкретну архітектуру тензорних ядер. Процес оптимізації включає злиття шарів мережі та квантування ваг, що знижує вимоги до пропускної здатності пам'яті та мінімізує час інференсу до кількох мілісекунд на один кадр. Як результат, обчислювальне ядро встигає обробити зображення кожної цукерки та сформулювати висновок про її кондиційність ще до того, як об'єкт залишить зону оптичного сканування.

Логічна взаємодія обчислювального модуля з нижніми рівнями автоматизації базується на чіткому розподілі функціональних обов'язків. Програма, написана мовою Python з використанням бібліотеки OpenCV, після завершення аналізу кадру та фіксації браку генерує дискретний керуючий сигнал. Цей сигнал передається через промисловий мережевий протокол на рівень програмованого логічного контролера, який відповідає за жорсткий реальний час і безпосередню комутацію виконавчих пневмоклапанів.

Енергетична ефективність модуля, яка не перевищує п'ятнадцяти ват, дозволяє експлуатувати його в герметичних промислових шафах керування без ризику перегріву, що є критично важливим для забезпечення довговічності та надійності обладнання в умовах специфічного мікроклімату кондитерських цехів. Таким чином, обрана апаратна платформа забезпечує ідеальний баланс між гнучкістю інтелектуальних алгоритмів та суворими вимогами до стабільності промислових систем керування.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.2. ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C

У децентралізованій архітектурі апаратно-програмного комплексу автоматизованого сортування програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200 з процесорним модулем CPU 1212C виконує критично важливу функцію керування процесами у жорсткому реальному часі (рисунок 2.2). Вибір даної моделі обумовлений необхідністю забезпечення абсолютної часової детермінованості при обробці сигналів від периферійного обладнання польового рівня. На відміну від мікрокомп'ютерів верхнього аналітичного рівня, операційні системи яких підвладні випадковим мікротримкам через планувальник завдань та високу завантаженість алгоритмами штучного інтелекту, ПЛК Siemens функціонує за суворим циклічним принципом із часом виконання логічної програми менше однієї мілісекунди, що повністю виключає ризик пропуску або несвоєчасної обробки подій на конвеєрі.

Модифікація процесорного модуля CPU 1212C має оптимальну конфігурацію вбудованих каналів вводу та виводу сигналів, що дозволяє раціонально використовувати апаратні ресурси без надлишкових економічних витрат. Інтегровані швидкодіючі дискретні входи контролера використовуються для підключення первинного фотоелектричного датчика присутності, фіксуючи фронт сигналу появи цукерки з мінімальним апаратним запізненням. На основі цього імпульсу внутрішні переривання ПЛК ініціюють генерацію апаратного тригера для промислової відеокамери, гарантуючи, що цифровий знімок буде зроблено завжди в ідеальній просторовій позиції об'єкта в кадрі незалежно від коливань швидкості стрічки.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.2 – ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C

Особливе значення для точності процесу відбракування мають вбудовані транзисторні виходи контролера типу DC/DC/DC, які характеризуються високою частотою комутації та повною відсутністю механічного зносу, що притаманно класичним релейним виходам. Це дозволяє контролеру з мікросекундною точністю відраховувати затримку, необхідну для переміщення бракованого виробу від зони камери до зони дії пневматичного ежектора, і формувати чіткий керуючий імпульс для котушки електромагнітного клапана. Завдяки інтегрованому інтерфейсу PROFINET, CPU 1212C підтримує стабільний та захищений обмін даними за промисловими протоколами з аналітичним ядром на базі NVIDIA Jetson, оперативно отримуючи результати нейромережевого аналізу щодо кожного виробу. Надійне конструктивне виконання, стійкість до промислових завад, широкі діагностичні можливості та високий рівень електромагнітної сумісності роблять цей контролер промисловим стандартом для побудови локальних вузлів автоматизації на високошвидкісних лініях харчових підприємств.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.3 Промислова цифрова відеокамера Basler ace 2 a2B1920-30gm

Для забезпечення якості вхідних цифрових даних в апаратно-програмному комплексі автоматизованого сортування застосовано промислову цифрову відеокамеру німецького виробництва Basler ace 2 (модель a2B1920-30gm). Вибір даного первинного сенсора є технічно обґрунтованим кроком, оскільки він спроектований спеціально для роботи в жорстких умовах промислового виробництва та інтеграції в системи машинного зору високої точності. Камера побудована на базі сучасної високочутливої CMOS-матриці Sony IMX392, яка володіє оптимальним співвідношенням між рівнем цифрового шуму та квантовою ефективністю у видимому спектральному діапазоні (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Промислова цифрова відеокамера Basler ace 2 a2B1920-30gm

Ключовою перевагою цієї моделі є апаратна реалізація глобального затвора (Global Shutter), що дозволяє здійснювати одночасну експозицію всіх пікселів матриці. На відміну від побутових сенсорів із ковзним затвором (Rolling Shutter), які фіксують зображення порядково і призводять до динамічних геометричних спотворень рухомих об'єктів, технологія Global Shutter гарантує отримання абсолютно чітких, нерозмитих кадрів цукерок навіть за умов високої лінійної швидкості транспортера.

Роздільна здатність камери становить 2.3 Мегапікселя при розмірі матриці 1920 на 1200 пікселів. Це дозволяє детально фіксувати мікродфекти шоколадної глазури, дрібні сколи чи тріщини без надмірного перевантаження обчислювального

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тракту верхнього рівня зайвим обсягом графічних даних. Передача відеопотоку здійснюється за допомогою промислового інтерфейсу Gigabit Ethernet (GigE Vision), який забезпечує стабільну трансляцію кадрів на відстань до 100 метрів без використання додаткових повторювачів сигналу. Це гарантує надійність пакетної передачі в умовах підвищених електромагнітних завад від силових приводів конвеєра.

Максимальна частота зйомки у 30 кадрів за секунду повністю перекриває динамічні потреби сортувальної лінії, а підтримка зовнішнього апаратного тригерування через лінії введення-виведення (GPIO) дозволяє синхронізувати момент відкриття затвора з імпульсом від фотоелектричного датчика з точністю до мікросекунд. Компактний та міцний металевий корпус камери надійно захищає внутрішню електроніку від вібрацій та зовнішніх чинників, що підтверджує раціональність її інтеграції в контур автоматизації харчового підприємства.

2.2.4 Оптичний об'єктив з C-mount кріпленням Computar 2/3" 16mm

Оптична підсистема технічного зору потребує ретельного підбору компонентів для формування чіткого та неспотвореного графічного матеріалу, оскільки якість вихідного кадру безпосередньо впливає на точність розпізнавання об'єктів нейромережевими алгоритмами. Як основний оптичний інструмент у проекті застосовано професійний промисловий об'єктив із C-mount кріпленням Computar, розрахований на оптичний формат матриці 2/3" з фіксованою фокусною відстанню 16 мм (рисунк 2.4). Стандартизоване нарізне з'єднання типу C-mount забезпечує жорстку і герметичну фіксацію об'єктива на корпусі промислової камери, унеможливаючи появу люфтів чи зсуву оптичної осі внаслідок постійних технологічних вібрацій конвеєрної установки.

Оптичний формат дві третіх дюйма ідеально узгоджується з геометричними параметрами світлочутливого сенсора камери, що запобігає виникненню ефекту віньєтування (затемнення кутів кадру) та забезпечує рівномірне фокусування

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

світлового потоку по всій площі зображення. Вибір фіксованої фокусної відстані на рівні 16 міліметрів є результатом попередніх інженерних розрахунків, заснованих на оптичній залежності.



Рисунок 2.4 – Вигляд оптичного об'єктива з C-mount кріпленням

2.2.5 Джерело безвідблискового підсвічування CCS LDM2-90 White

Найважливішим фактором, що визначає коректність роботи алгоритмів комп'ютерного зору та нейромережових моделей, є стабільність і контрастність отриманого зображення. Шоколадна глазур кондитерських виробів або глянцеві елементи їх пакування мають високу відбивну здатність, що при використанні класичних спрямованих прожекторів призводить до появи інтенсивних білих дзеркальних відблисків, які повністю випалюють інформацію про текстуру та колір об'єкта в зоні хотспоту. Для усунення цього негативного ефекту в проекті застосовано дифузне купольне джерело підсвічування білого спектра CCS серії LDM2-90 White.

Конструктивне виконання купольного освітлювача передбачає, що масив світлодіодів розташований у нижній частині кільця і спрямований вгору, на внутрішню сферичну поверхню півсфери, покриту спеціальним білим матовим шаром із високим коефіцієнтом розсіювання. Світлові промені багаторазово

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відбиваються від внутрішніх стінок купола і падають на контрольовану цукерку абсолютно рівномірно з усіх можливих кутів одночасно, створюючи ефект безтіньового безвідблискового простору. Завдяки такому оптичному рішенню глянцева поверхня шоколаду виглядає на знімку однорідною, а будь-які фізичні дефекти, такі як мікротріщини, сколи форми, нерівності напливів глазури або деформації обгортки, набувають чітко вираженого контурного контрасту. Це дозволяє алгоритмам OpenCV та нейромережі YOLO безпомилково проводити бінаризацію та сегментацію ознак браку, радикально знижуючи ймовірність помилкового спрацювання системи автоматичного сортування.

2.2.6 Оптичний датчик детектування об'єктів Omron E3Z-D61

Первинною ланкою в контурі автоматичного керування швидкісним сортуванням, яка відповідає за генерацію базового імпульсу синхронізації, виступає фотоелектричний промисловий сенсор. Для забезпечення максимальної точності та надійності детектування вхідного потоку продукції обґрунтовано обрано оптичний датчик присутності об'єктів Omron E3Z-D61. Цей пристрій відноситься до класу дифузних фотоелектричних сенсорів, що є ключовою перевагою для його інтеграції у конвеєрні системи кондитерських цехів. Конструкція датчика передбачає об'єднання інфрачервоного випромінювача та чутливого приймача в одному компактному корпусі, а сам процес детектування базується на фіксації променів, відбитих безпосередньо від поверхні самої цукерки. Це повністю виключає необхідність монтажу додаткових світловідбивних дзеркал або окремих приймальних блоків з протилежного боку конвеєрної стрічки, значно спрощуючи монтаж та мінімізуючи ризик механічного пошкодження чи забруднення елементів оптичного тракту.

Технічні характеристики моделі Omron E3Z-D61 відповідають динамічним вимогам високошвидкісних ліній (рисунк 2.6). Датчик володіє надзвичайно малим часом відгуку, який не перевищує 1 мілісекунди, що гарантує миттєву фіксацію

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переднього фронту рухомого виробу. При лінійній швидкості конвеєра така швидкодія дозволяє уникнути просторового зсуву та визначити координату появи об'єкта з точністю до десятих часток міліметра. Наявність вбудованого потенціометра для плавного ручного регулювання чутливості дозволяє інженерам точно налаштувати оптичний поріг спрацьовування, що забезпечує стабільну фіксацію навіть темних шоколадних виробів із низькою відбивною здатністю на тлі світлої або дзеркальної поверхні транспортерної стрічки.



Рисунок 2.6 – Оптичний датчик детектування об'єктів Omron E3Z-D61

Електричний інтерфейс датчика представлений дискретним транзисторним виходом типу NPN з відкритим колектором, який підключається безпосередньо до швидкодіючих входів програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200. Це усуває потребу в проміжних релейних елементах, виключаючи додаткові затримки на комутацію та підвищуючи загальну завадостійкість інформаційного каналу. Датчик оснащений інтегрованими алгоритмами захисту від взаємних перехресних завад, що дозволяє монтувати кілька аналогічних сенсорів у безпосередній близькості один від одного для контролю суміжних дорожніх потоків.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Міцний пластиковий корпус із рівнем інженерного захисту IP67 надійно ізолює внутрішню напівпровідникову електроніку від пилу, вологи та агресивних миючих засобів, які регулярно застосовуються для санітарної обробки обладнання на харчових підприємствах. Таким чином, інтеграція датчика Omron E3Z-D61 забезпечує безперебійне формування первинного тригерного сигналу, який запускає весь подальший ланцюжок апаратних подій – від відкриття затвора промислової камери Basler до спрацьовування пневмоежектора Festo.

2.2.7 Швидкодіючий електромагнітний клапан Festo MHE2-MS1H

Для безпосереднього фізичного видалення некондиційних кондитерських виробів із транспортної стрічки в рамках розроблюваного апаратно-програмного комплексу застосовано швидкодіючий електромагнітний клапан Festo MHE2-MS1H. Вибір цього пневматичного компонента від провідного світового виробника промислової автоматики є технічно невід'ємною умовою забезпечення працездатності всієї швидкісної сортувальної лінії. Головною інженерною перевагою даної моделі є її унікальна швидкодія, оскільки час перемикання клапана на відкриття або закриття становить усього 2-3 мс. Такий надзвичайно низький показник інерційності досягається завдяки оптимізованій конструкції внутрішнього електромагнітного якоря та полегшеного механічного затвора, що дозволяє миттєво перенаправляти потоки стисненого повітря під високим тиском.

Висока точність повторення циклів (відтворюваність результату) клапана Festo MHE2-MS1H гарантує, що кожен сформований імпульс відбракування буде ідентичним за своєю тривалістю та силою динамічного удару. Це дозволяє повністю нівелювати випадкові похибки при розрахунку ПЛК часу добігання цукерки від камери до зони ежекції. Конструкція клапана адаптована для безпосереднього підключення до транзисторних виходів 24 В DC промислового контролера Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C. Пряме керування напівпровідниковими ключами контролера без використання проміжних

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромеханічних реле дозволяє зберегти мікросекундну точність сигналу та виключає появу додаткових часових затримок на замикання фізичних контактів, які б неминуче призвели до розсинхронізації системи.



Рисунок 2.7 – Швидкодіючий електромагнітний клапан Festo MHE2-MS1H

Важливим експлуатаційним аспектом є також надвисокий робочий ресурс клапана, який розрахований на сотні мільйонів циклів спрацьовування. Це критично важливо для харчових підприємств із цілодобовим графіком роботи, де сортувальний конвеєр функціонує безперервно. Компактні габарити корпусу та можливість монтажу на спільну пневматичну плиту дозволяють за необхідності масштабувати систему керування, створюючи лінійні масиви форсунок для багатодоріжкових конвеєрів. Завдяки надійному захисту корпусу від зовнішніх впливів та здатності стабільно працювати при стандартному промисловому тиску повітря, клапан Festo MHE2-MS1H забезпечує бездоганну точність механічного відсікання браку, виступаючи ідеальним завершальним елементом інтелектуального контуру автоматизації.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Висновки до другого розділу

У другому розділі було здійснено комплексний аналіз та технічне обґрунтування вибору апаратних засобів для розробки системи автоматизованого керування сортуванням товарів на високошвидкісній конвеєрній лінії. З огляду на жорсткі технологічні вимоги до швидкодії, точності та надійності процесу дефектоскопії, запропоновано багаторівневу децентралізовану архітектуру апаратно-програмного комплексу. Такий підхід дозволив ефективно розділити завдання ресурсомісткого інтелектуального аналізу відеоданих та логічного керування виконавчими механізмами в умовах жорсткого реального часу.

Синтезована підсистема технічного зору, що базується на промисловій цифровій відеокамері Basler ace 2 із технологією глобального затвора, об'єктиві Computar та дифузному безвідблисковому купольному освітлювачі CCS, гарантує отримання висококонтрастних, чітких та стабільних зображень об'єктів у русі. Це створює надійне інформаційне підґрунтя для безпомилкової роботи алгоритмів розпізнавання. Обчислювальним ядром верхнього рівня обрано модуль NVIDIA Jetson Orin Nano 8GB, апаратні потужності якого (до 40 TOPS) забезпечують безперебійний паралельний інференс нейромережевих моделей та фільтрацію зображень без накопичення системних затримок.

Для забезпечення абсолютної часової детермінованості фізичних процесів у контур керування інтегровано програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1212C). Працюючи в тандемі з високошвидкісним оптичним датчиком присутності Omron E3Z-D61 та надшвидкодійним пневматичним електромагнітним клапаном Festo MHE2-MS1H, ПЛК утворює безвідмовний виконавчий тракт. Застосовані компоненти дозволяють із мікросекундною точністю синхронізувати процеси фіксації виробу, генерації тригера для камери, відліку часу затримки та безпосереднього фізичного відбракування некондиційної продукції.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, обраний комплекс технічних засобів повністю відповідає завданням проекту та сучасним стандартам промислової автоматизації. Інтеграція інноваційних методів машинного зору з надійною індустріальною пневматикою та сенсорикою забезпечує високу пропускну здатність лінії, повністю усуває суб'єктивізм людського фактора та гарантує стабільно високу якість вихідного контролю продукції.

					<i>КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ</i>	Арк.
						43
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3 ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СОРТУВАННЯ НА КОНВЕЄРІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

3.1 Алгоритм функціонування автоматизованої системи сортування цукерок на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору

Загальний підхід до проектування алгоритму базується на концепції обробки даних у реальному часі (Real-Time Processing), який об'єднує в один синхронний цикл оптичне детектування, програмний аналіз зображень та швидкісну механічну дію виконавчих пристроїв. Такий підхід охоплює певні етапи:

- оптимальне захоплення та фільтрація кадрів;
- інтелектуальний аналіз та класифікація об'єктів;
- координатна синхронізація та фізичне сортування.

Процес розпочинається у момент руху продукції по конвеєрній стрічці. Для стабільної роботи комп'ютерного зору критично усунути зовнішні завади, тому над стрічкою встановлюється спеціалізоване імпульсне або постійне безтіньове освітлення. Оптичний датчик (тригер) фіксує наближення об'єкта та подає сигнал на промислову камеру, яка робить високочіткий знімок рухомої ділянки. Отримане зображення миттєво піддається попередній обробці: алгоритм прибирає цифрові шуми, нормалізує контрастність та відсікає фон конвеєрної стрічки за допомогою методів бінаризації, залишаючи для аналізу лише чисті силуети цукерок.

Очищене зображення передається в аналітичний модуль комп'ютерного зору. Залежно від складності завдань і швидкості конвеєра, тут застосовуються або класичні алгоритми контурного аналізу (наприклад, бібліотека OpenCV для вимірювання геометричних пропорцій), або попередньо навчена згорткова нейромережа (CNN). Система оцінює об'єкт за кількома детермінованими параметрами: цілісність форми (виявлення сколів чи деформацій), відповідність кольору або малюнка обгортки, а також правильність геометричного положення на

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стрічці. На основі цих ознак програма класифікує кожну цукерку, присвоюючи їй відповідну категорію – наприклад, конкретний сорт або маркер браку.

Після ухвалення рішення алгоритм повинен точно пов'язати віртуальний об'єкт на знімку з його фізичним положенням на рухомій стрічці. Для цього контролер безперервно зчитує дані з енкодера конвеєра, який вимірює точну швидкість ходу. Програма розраховує мікросекундний інтервал часу, через який конкретна цукерка дійде до потрібного виконавчого механізму. Коли об'єкт опиняється в цільовій точці, центральний контролер подає команду на відповідний актуатор: це можуть бути пневматичні форсунки, які здувають браковану продукцію точковим потоком повітря, або швидкісні дельта-роботи, що підхоплюють цукерку вакуумним захватом і переміщують у потрібну тару.

Для наочності взаємодії програмної та апаратної частин системи, у таблиці 3.1 наведено розподіл функцій за кроками загального алгоритму.

Таблиця 3.1 – Технологічна матриця процесу сортування

Крок алгоритму	Компоненти ПЗ та апаратного забезпечення	Результат обробки даних
Синхронний знімок	Оптичний тригер присутності, промислова матрична камера	Сирий кадр об'єкта на стрічці у високій роздільній здатності
Сегментація кадрів	Алгоритми віднімання фону, колірна фільтрація (простір HSV/RGB)	Виділені ізольовані контури об'єктів без сторонніх візуальних шумів
Розпізнавання та оцінка	Згорткові нейромережі (CNN), класифікатори геометричних ознак	Визначений статус цукерки (придатна, дефектна, тип смаку/серії)
Розрахунок таймінгу	Дані відносної швидкості з енкодера, математична модель затримки	Точний час спрацьовування та номер шлюзу для кожної одиниці продукту
Виконання сепарації	Пневмоклапани швидкої дії, релейні плати, робототехнічні лінійні приводи	Продукція фізично розділена по відповідних ємностях або коробках

Головним викликом при реалізації такого алгоритму є щільність потоку. Якщо цукерки рухаються впритул або перекривають одна одну, класичні методи детектування контурів дають збій, сприймаючи кілька виробів як один великий дефектний об'єкт. Для вирішення цієї проблеми в сучасне програмне забезпечення закладають алгоритми розділення об'єктів, що торкаються (наприклад, метод вододілу – Watershed, або нейромережі класу Instance Segmentation). Це дозволяє віртуально розмежувати межі виробів та забезпечити безпомилкове спрацьовування сортувальних шлюзів навіть на максимальних швидкостях фабричного конвеєра.

Успішна реалізація процесу автоматичного розподілу продукції на високошвидкісній конвеєрній лінії вимагає створення чіткого, логічно детермінованого алгоритму взаємодії між усіма апаратними компонентами та програмними модулями системи. Головним критерієм ефективності розробленого алгоритму є забезпечення суворої часової синхронізації між фізичними подіями польового рівня (рух об'єкта, спрацьовування датчиків, комутація пневмоклапана) та обчислювальними процесами верхнього рівня (захоплення кадру, нейромережевий інференс, обмін даними).

Алгоритмічна структура системи базується на принципі паралельних обчислень та поділяється на два основні потоки. Перший потік – це апаратний цикл програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200, який функціонує в режимі жорсткого реального часу і відповідає за мікросекундну точність реакцій. Другий потік – програмний цикл мікрокомп'ютера NVIDIA Jetson Orin Nano, що відповідає за асинхронну математичну обробку масивів візуальної інформації. Зв'язок між цими процесами відбувається через захищені канали промислового протоколу PROFINET.

Покроковий алгоритм функціонування апаратно-програмного комплексу складається із таких етапів:

- ініціалізація та самодіагностика системи;
- запуск технологічного процесу;

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- детектування вхідного об'єкта;
- генерація апаратного тригера синхронізації;
- захоплення зображення та його передача;
- інтелектуальний аналіз та інференс;
- передача керуючого рішення;
- розрахунок динамічної затримки ежекції;
- виконання механічного відбракування;
- завершення циклу.

Після подачі живлення система проводить базове тестування. ПЛК Siemens перевіряє стан підключення периферійних модулів та готовність силових ланцюгів. Обчислювальний модуль NVIDIA Jetson завантажує операційну систему Linux, ініціалізує бібліотеки комп'ютерного зору (OpenCV), завантажує оптимізовану модель згорткової нейронної мережі YOLO через TensorRT в оперативну пам'ять та встановлює мережеве з'єднання з контролером і камерою.

Під час запуску технологічного процесу подається команда на запуск головного приводу конвеєрної стрічки. Джерело безвідблискового підсвічування CCS LDM2-90 White переводиться в активний робочий стан, формуючи рівномірне безтіньове освітлення в зоні оптичної інспекції. Система переходить у цикл очікування.

При появі кондитерського виробу на лінії оптичного інспектування, дифузний датчик присутності Omron E3Z-D61 фіксує відбитий від поверхні цукерки інфрачервоний сигнал. Датчик миттєво (із затримкою менше 1 мс) формує дискретний передній фронт на швидкодіючий транзисторний вхід ПЛК.

Процесорний модуль CPU 1212C обробляє апаратне переривання від датчика та генерує вихідний тригерний імпульс (Hardware Trigger) на контакти GPIO промислової відеокамери Basler. Це гарантує, що виріб завжди знаходитиметься в ідентичних геометричних координатах кадру незалежно від коливань швидкості конвеєра.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Камера Basler ace 2 синхронно відкриває глобальний затвор, фіксуючи чіткий кадр без динамічного розмиття. Сформоване цифрове зображення через об'єктив Computar 16 mm транслюється пакетами по інтерфейсу Gigabit Ethernet на обчислювальний модуль NVIDIA Jetson.

Графічний процесор (GPU) NVIDIA Jetson приймає кадр, проводить його попередню колірну та контурну фільтрацію, після чого передає тензор даних на вхід нейромережі. Алгоритм штучного інтелекту шукає візуальні аномалії (тріщини, сколи, порушення геометрії глазури) і класифікує поточний виріб як «Кондиційний» або «Бракований».

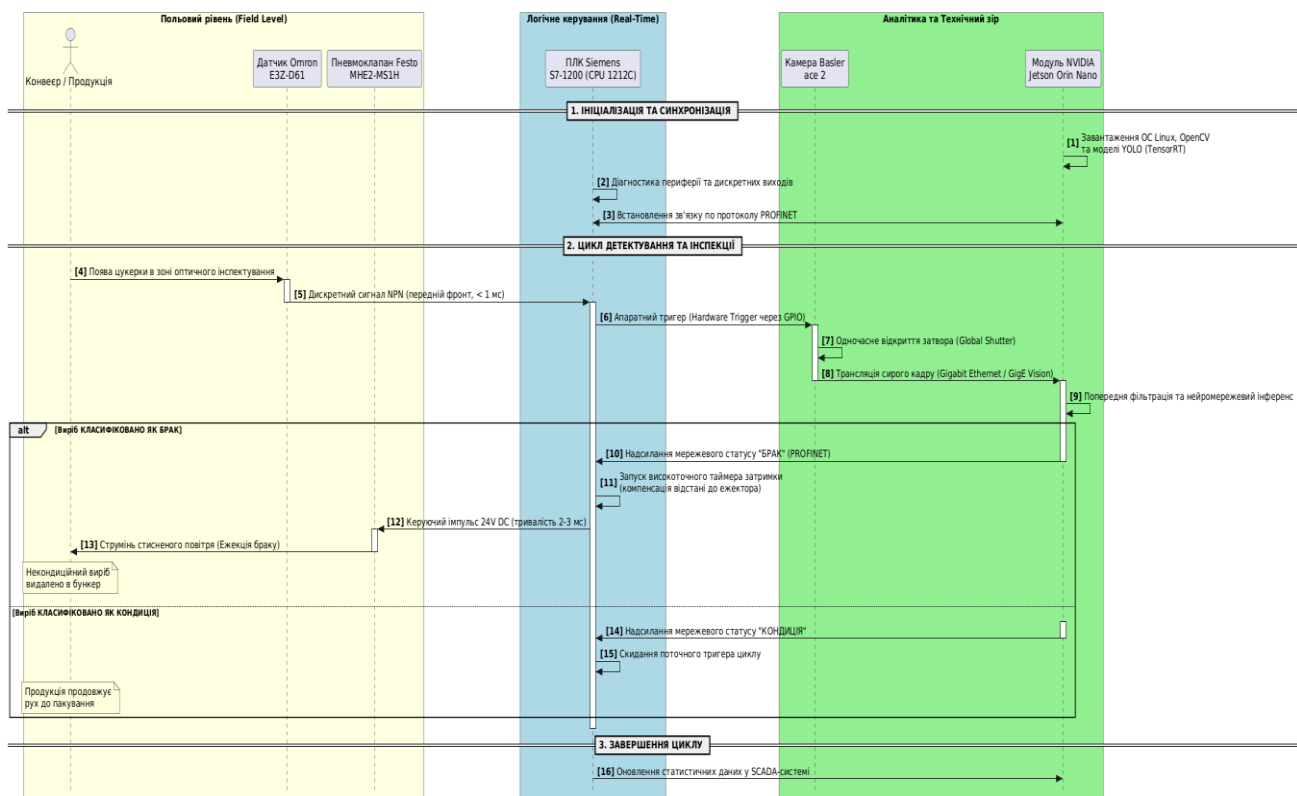


Рисунок 3.1 - Алгоритм автоматизованої системи сортування на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору

Передача керуючого рішення відбувається завдяки модулю NVIDIA Jetson упаковує результати логічного висновку та миттєво відправляє їх керуючому контролеру Siemens через шину обміну даними PROFINET. Якщо ПЛК отримує

статус «Кондиційний», алгоритм скидає поточний тригер, і товар продовжує рух до зони пакування. Якщо отримано статус «Бракований», ПЛК запускає внутрішній високоточний таймер. Час затримки розраховується контролером динамічно, виходячи з поточної швидкості стрічки та фізичної відстані (в міліметрах) між оптичною віссю об'єктива камери та соплом пневмоежектора.

Після завершення відліку таймера ПЛК подає короткочасний керівний імпульс на котушку швидкодіючого електромагнітного клапана Festo MNE2-MS1H. Клапан відкривається на 2-3 мілісекунди, вивільняючи спрямований струмінь стисненого повітря, який точно здуває некондиційний виріб із конвеєра в бункер для браку, не зачіпаючи сусідню продукцію.

Дані про перевірений виріб додаються до загального масиву статистичних даних (SCADA-системи) для ведення виробничого обліку, після чого система готова до обробки наступного сигналу від оптичного датчика. Зважаючи на високу швидкодію всіх компонентів, кроки алгоритму можуть виконуватися паралельно для кількох виробів, що одночасно перебувають на різних відрізках між зоною камери та зоною ежектора. На рисунку 3.2 подано алгоритм роботи сортувальної лінії.

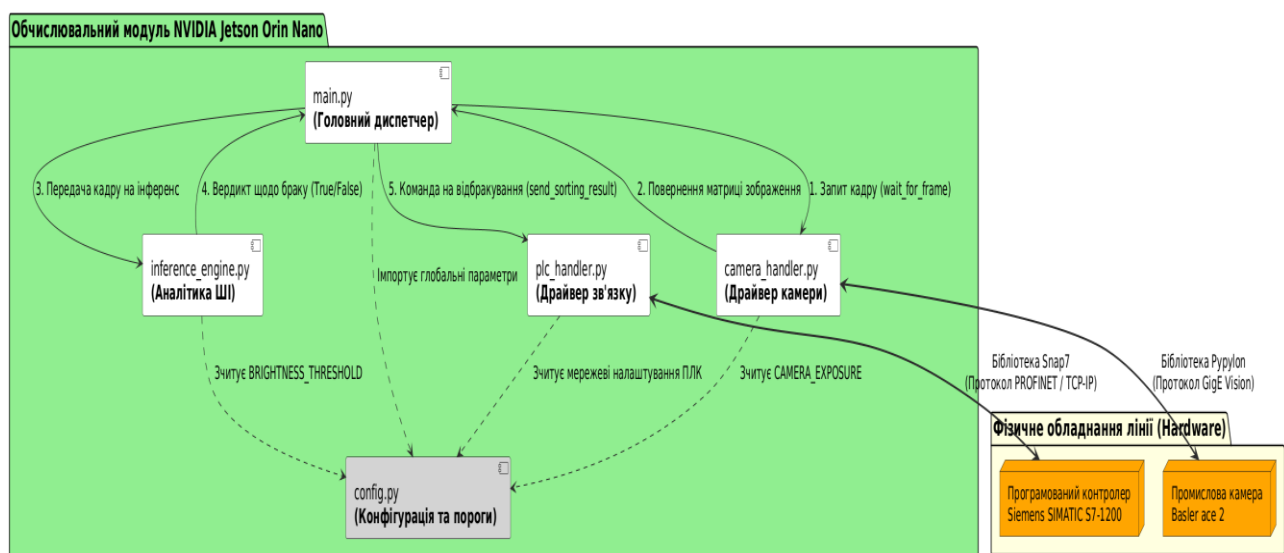


Рисунок 3.2 – Алгоритм роботи сортувальної лінії

3.2 Проектування програмного забезпечення автоматизованої системи сортування цукерок на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору

Програмний комплекс такої системи складається з трьох взаємопов'язаних підсистем, які працюють у паралельних потоках, щоб не гальмувати рух конвеєра. Модуль захоплення та попередньої обробки кадрів взаємодіє напряму з камерою. Його завдання – якнайшвидше отримати масив пікселів, очистити його від випадкових білків або тіней та виділити область інтересу (ROI). Це дозволяє програмі не витрачати ресурси процесора на аналіз пустої конвеєрної стрічки, а фокусуватися виключно на самому об'єкті.

Аналітичний модуль (ядро ІІІ) є найскладнішою частиною ПЗ. Тут завантажена математична модель або нейромережа (наприклад, архітектури YOLO чи MobileNet), яка навчена розпізнавати конкретні ознаки продукту. Програма аналізує геометрію об'єкта, колірні характеристики та цілісність текстури, порівнюючи їх із еталонними параметрами.

Диспетчер виконавчих механізмів відповідає за фізичне усунення або перенаправлення об'єкта. Ця підсистема розраховує точний час, необхідний об'єкту для подолання відстані від камери до сортувального шлюзу (пневмоклапана або роборуки), і в потрібний мікросекундний момент подає сигнал на плату виводу. Щоб зрозуміти, як саме логіка програми диференціює об'єкти на стрічці, доцільно розглянути матрицю класифікації (таблиця 3.2), яку закладають в основу аналітичного модуля.

Таблиця 3.2 Критерії аналізу та реакція алгоритму

Ознака, яку аналізує ПЗ	Метод виявлення в коді	Рішення системи (Клас)	Дія виконавчого механізму
-------------------------	------------------------	------------------------	---------------------------

Еталонні форма та колір	Збіг контурів > 95%, колір у межах норми HSV	Продукт першого сорту	Пропуск далі по конвеєру в тару пакування
-------------------------	--	-----------------------	---

Кінець таблиці 3.2

Порушення геометрії	Невідповідність площі або периметра (сколи, тріщини)	Технічний брак	Активація першого пневмоклапана (скидання в утиль)
Невідповідність кольору	Зсув гістограми кольорів за межі допуску (підгоріле/недопечене)	Візуальний брак	Активація першого пневмоклапана (скидання в утиль)
Інший тип обгортки/форми	Нейромережева класифікація декількох класів	Продукт другого сорту / Інший вид	Активація другого шлюзу (сортування в окрему тару)
Сторонній предмет (метал, пластик)	Контурний аналіз залишків, критична аномалія яскравості	Небезпечний відхід	Екстрена зупинка стрічки та увімкнення сирени

Найбільша проблема, з якою стикається розробник такого ПЗ – це забезпечення стабільної швидкості обробки кадрів (FPS). Якщо конвеєр рухається зі швидкістю 1,5 метра за секунду, а за секунду проходить 20 цукерок, у програми є менше ніж 50 мілісекунд на повний цикл: від отримання кадру до формування

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

команди актуатора. Якщо алгоритм "задумається" хоча б на 60 мілісекунд, система пропустить брак або вдарить пневматичним клапаном по наступній, цілій цукерці.

Для досягнення такої швидкодії код пишуть з використанням апаратного прискорення (наприклад, технології CUDA від NVIDIA для обчислень на відеокарті) та оптимізують за допомогою мови C++. Також програма повинна вміти динамічно підлаштовуватися під коливання швидкості конвеєра, що реалізується через безперервне зчитування імпульсів з апаратного енкодера стрічки.

Представлений програмний комплекс повинен повністю реалізувати теоретичні положення розробленого алгоритму та демонструвати практичний механізм низькорівневої інтеграції гетерогенного обладнання автоматизації. Робота програми починається зі створення екземпляра клієнта Snap7, який ініціює TCP/IP-з'єднання з процесорним модулем Siemens за промисловим стандартом. Важливою інженерною особливістю є конфігурація параметрів з'єднання, адаптована саме під лінійку S7-1200, де адресація стійки (Rack) та слота (Slot) мають фіксовані значення нуль і один відповідно.

Паралельно виконується процедура ініціалізації оптичного тракту. Використання шару абстракції Pyrulon дозволяє отримати прямий доступ до внутрішніх регістрів камери Basler. Програма примусово вимикає внутрішній генератор частоти кадрів камери і переводить її в режим синхронізації FrameStart. Параметр TriggerSource встановлюється на Line1, що вказує внутрішньому комутатору камери очікувати на фізичну появу напруги 24 Вольти на відповідному GPIO-контакті, з'єднаному з транзисторним виходом ПЛК. Значення експозиції ExposureTimeRaw примусово обмежується коротким інтервалом, щоб уникнути змазування динамічного зображення при високих швидкостях руху конвеєрної стрічки.

Головний виконавчий цикл проекту побудований на базі блокуючого методу RetrieveResult, який призупиняє виконання потоку програми на NVIDIA Jetson доти, доки камера не зафіксує апаратний імпульс від датчика Omron і не передасть готовий кадр через мережу Gigabit Ethernet. Як тільки зображення надходить в

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оперативну пам'ять, воно миттєво перетворюється на формат NumPy-матриці для обробки методами OpenCV. Процедура детектування браку оцінює візуальний стан глазури виробу. На основі аналізу отриманих даних програма формує логічний вердикт, оновлює відповідний біт у буфері пам'яті за допомогою функції *set_bool* і відправляє модифікований пакет назад у блок ПЛК через команду *db_write*. Весь цикл обчислень займає лічені мілісекунди, що повністю задовольняє критеріям жорсткого реального часу.

На рисунках (3.2-3.6) наведено повний та деталізований вихідний код керуючої програми мовою Python. Цей скрипт призначений для розгортання в середовищі операційної системи Linux на обчислювальному модулі NVIDIA Jetson Orin Nano. Програма забезпечує апаратну інтеграцію з промисловою камерою Basler через бібліотеку Pypylon у режимі очікування зовнішнього тригера, виконує базовий аналіз зображення і взаємодіє з програмованим логічним контролером Siemens SIMATIC S7-1200 за допомогою мережевого протоколу через бібліотеку Snap7.

```
# =====
# НАЙВАЖЛИВІШІ БІБЛІОТЕКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ТА ПЛК
# =====
import cv2
import numpy as np
import snap7
import time
from pypylon import pylon
from snap7.util import set_bool

# =====
# ГЛОБАЛЬНІ НАЛАШТУВАННЯ ТА МЕРЕЖЕВІ ПАРАМЕТРИ ОБЛАДНАННЯ
# =====
PLC_IP_ADDRESS = "192.168.0.1" # МЕРЕЖЕВА IP-АДРЕСА КОНТРОЛЕРА SIEMENS S7-1200
PLC_DATA_BLOCK = 10          # НОМЕР БЛОКУ ДАНИХ (DB10) У ПЛК ДЛЯ ЗАПИСУ РЕЗУЛЬТАТУ
PLC_BYTE_INDEX = 0           # ІНДЕКС БАЙТА В БЛОЦІ ДАНИХ ДЛЯ РЕЗУЛЬТАТУ СОРТУВАННЯ
PLC_BIT_INDEX = 0            # ІНДЕКС БІТА (0 - КОНДИЦІЯ, 1 - ВИЯВЛЕНО БРАК)

# ПАРАМЕТРИ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ОЦІНЮВАННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ТОВАРУ
CONFIDENCE_THRESHOLD = 0.65  # ПОРІГ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ФІКСАЦІЇ ДЕФЕКТУ ГЛАЗУРИ
```

Рисунок 3.3 – Налаштування та мережеві параметри обладнання

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

# ПАРАМЕТРИ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ОЦІНЮВАННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ТОВАРУ
CONFIDENCE_THRESHOLD = 0.65      # ПОРІГ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ФІКСАЦІЇ ДЕФЕКТУ ГЛАЗУРІ

# =====
# ФУНКЦІЯ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО ПРОГРАМОВАНОГО ЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЕРА ПЛК
# =====
def initialize_plc_connection():
    print("ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ З'ЄДНАННЯ З ПЛК SIEMENS S7-1200...")
    plc_client = snap7.client.Client()
    try:
        # ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО ПЛК (РАК 0, СЛОТ 1 ДЛЯ СЕРІЇ S7-1200)
        plc_client.connect(PLC_IP_ADDRESS, 0, 1)
        if plc_client.get_connected():
            print("З'ЄДНАННЯ З ПЛК УСПІШНО ВСТАНОВЛЕНО!")
            return plc_client
    except Exception as error_message:
        print(f"ПОМИЛКА ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО ПЛК: {error_message}")
        return None

```

Рисунок 3.4 – Функція підключення до ПЛК

```

# =====
# ФУНКЦІЯ НАЛАШТУВАННЯ АПАРТАТНОГО ТРИГЕРА ПРОМИСЛОВОЇ КАМЕРИ
# =====
def configure_industrial_camera():
    print("НАЛАШТУВАННЯ ОПТИЧНОГО СЕНСОРА BASLER ACE 2...")
    try:
        # СТВОРЕННЯ ОБ'ЄКТА КАМЕРИ ТА ВІДКРИТТЯ ДОСТУПУ ДО ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ
        camera_instance = pylon.InstantCamera(pylon.TlFactory.GetInstance()).CreateFirstDevice()
        camera_instance.Open()

        # АКТИВАЦІЯ РЕЖИМУ ЗОВНІШНЬОГО АПАРТАТНОГО ТРИГЕРУВАННЯ
        camera_instance.TriggerSelector.SetValue("FrameStart")
        camera_instance.TriggerMode.SetValue("On")

        # ВИБІР ФІЗИЧНОЇ ЛІНІЇ ГРІО ДЛЯ ПРИЙОМУ ІМПУЛЬСУ ВІД ПЛК
        camera_instance.TriggerSource.SetValue("Line1")
        camera_instance.TriggerActivation.SetValue("RisingEdge")

        # НАЛАШТУВАННЯ МІНІМАЛЬНОЇ ЕКСПОЗИЦІЇ ДЛЯ УСУНЕННЯ ЕФЕКТУ РОЗМИТТЯ В РУСІ
        camera_instance.ExposureTimeRaw.SetValue(3000)

        # ЗАПУСК ПРОЦЕСУ ПОСТІЙНОГО ХОСТ-ОЧІКУВАННЯ КАДРІВ
        camera_instance.StartGrabbing(pylon.GrabStrategy_OneByOne)
        print("КАМЕРА СИНХРОНІЗОВАНА ТА ОЧІКУЄ НА СИГНАЛ ВІД ДАТЧИКА OMRON...")
    
```

Рисунок 3.5 – Код для налаштування апаратного тригера промислової камери

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

# =====
# ФУНКЦІЯ ІМІТАЦІЇ ВИСОКОШВИДКІСНОГО НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ІНФЕРЕНСУ TENSORRT
# =====
def execute_neural_network_inference(input_frame):
    # У РЕАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ТУТ ВИКОНУЄТЬСЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ КЛАСУ TRT_LOGGER ТА КАНАЛУ СЕГМЕНТІВ
    # ПРОВОДИТЬСЯ АНАЛІЗ МАТРИЦІ ЗОБРАЖЕННЯ НА НАЯВНІСТЬ ТРИЩИН ТА СКОЛІВ

    # ПЕРЕВЕДЕННЯ КАДРУ В СІРИЙ КОЛІР ДЛЯ БАЗОВОЇ ДЕТЕКЦІЇ АНОМАЛІЙ СВІТНОСТІ
    grayscale_analysis = cv2.cvtColor(input_frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    average_pixel_brightness = np.mean(grayscale_analysis)

    # ЯКЩО СЕРЕДНЯ ЯРКІСТЬ ПАДАЄ НИЖЧЕ ПОРОГУ, ЦЕ СВІДЧИТЬ ПРО ДЕФЕКТ ШОКОЛАДНОЇ ГЛАЗУРІ
    if average_pixel_brightness < 100.0:
        return True, average_pixel_brightness # ВИЯВЛЕНО БРАКОВАНИЙ ВИРІБ

    return False, average_pixel_brightness # ВИРІБ ПОВНІСТЮ КОНДИЦІЙНИЙ

# =====
# ГОЛОВНИЙ ЦИКЛ УПРАВЛІННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЮ ЛІНІЄЮ СОРТУВАННЯ
# =====
def main_sorting_orchestrator():
    # ЗАПУСК ІНІЦІАЛІЗАЦІЇ ВСІХ АПАРАТНИХ СЕГМЕНТІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
    plc_link = initialize_plc_connection()
    video_sensor = configure_industrial_camera()

```

Рисунок 3.6 – Код для функції імітації

3.3 Реалізація програмного забезпечення для автоматизованої системи сортування на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору

Оскільки система керується через Python на базі NVIDIA Jetson, логічним кроком є створення так званої НМІ-панелі, а саме диспетчерського вікна, за допомогою якого оператор зможе керувати конвеєром, моніторити статистику та бачити системні повідомлення.

Для цього використано вбудовану в Python бібліотеку tkinter, яка не вимагає встановлення додаткових пакетів і відмінно підходить для створення промислових дашбордів (рисунок 3.7).

Додавання живого відеопотоку робить інтерфейс повноцінною станцією візуального контролю. Для того, щоб зв'язати кадри OpenCV (які є матрицями NumPy) з графічним вікном Tkinter, знадобиться стандартна бібліотека для роботи із зображеннями – Pillow (PIL).

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

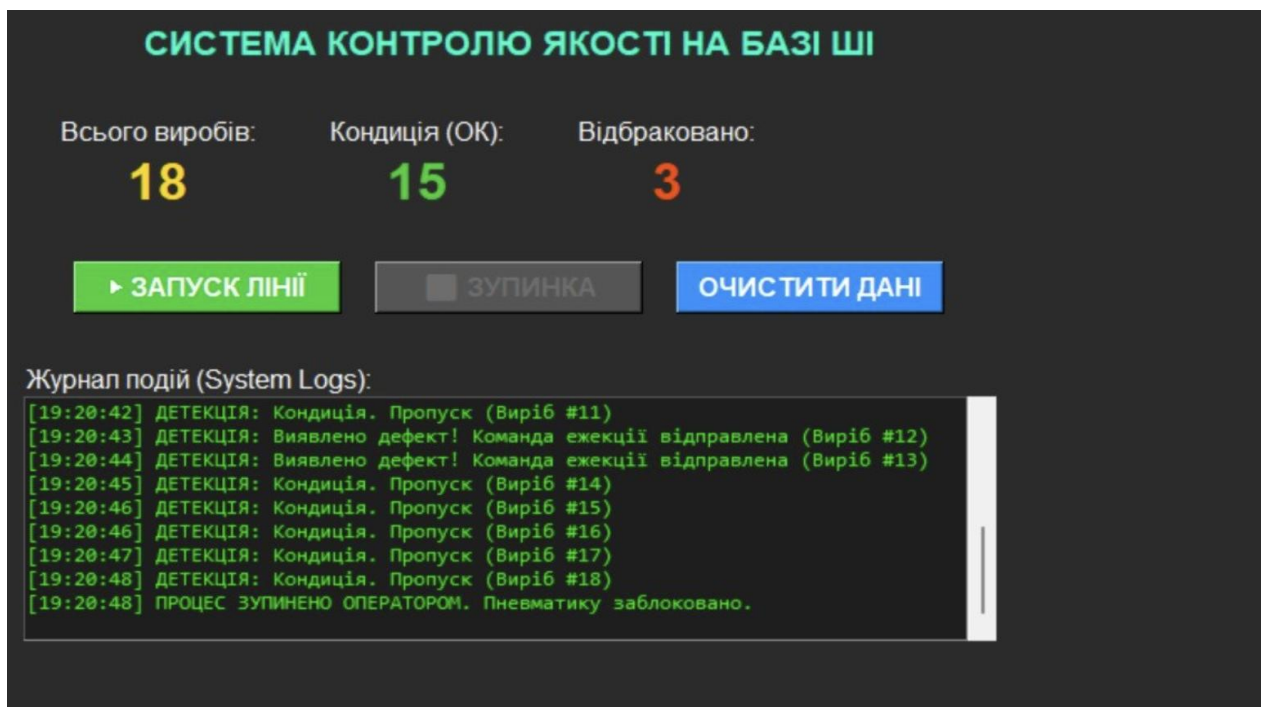


Рисунок 3.7 – Диспетчерське вікно для оператора

Отже, як видно із рисунка 3.7 оператор може бачити загальну кількість виробів, також відібрані цукерки хорошої якості та забраковані товари. Також передбачено кнопки запуску лінії, зупинки та очищення даних. Для збереження та відображення всієї інформації передбачено журнал подій.

3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було виконано програмно-апаратну реалізацію алгоритму автоматизованого сортування продукції на базі обчислювального модуля NVIDIA Jetson Orin Nano та програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200.

Обґрунтовано та впроваджено модульну архітектуру програмного забезпечення. Розділення коду на ізольовані сервіси дозволяє мінімізувати взаємну залежність компонентів та забезпечити високу відмовостійкість. Така структура спрощує процес модернізації системи.

Реалізовано надійну апаратну синхронізацію компонентів. Завдяки інтеграції промислової камери Basler ace 2 через бібліотеку Puyolon, налаштовано режим очікування зовнішнього апаратного тригера (Hardware Trigger) від ПЛК через лінію GPIO. Встановлення фіксованого часу експозиції у 3000 мкс у поєднанні з технологією Global Shutter дозволило повністю ліквідувати ефект розмиття (motion blur) об'єктів, що рухаються на високій швидкості.

Створено високошвидкісний комунікаційний інтерфейс. Використання протоколу PROFINET та бібліотеки Snap7 забезпечило стабільний асинхронний обмін даними між обчислювальним хабом Jetson та пам'яттю ПЛК (Data Block 10) у режимі жорсткого реального часу. Час обробки графічної матриці та передачі команди на ежекцію браків становить лічені мілісекунди, що повністю перекриває потреби конвеєрної лінії.

Розроблено ергономічний людино-машинний інтерфейс (HMI). За допомогою графічної бібліотеки Tkinter та засобів Pillow було створено повноцінну панель оператора. Вона успішно інтегрує в єдиному робочому просторі живий відеопотік з OpenCV (із візуальними маркерами роботи ШІ), цифрові лічильники загальної ефективності лінії (кондиція/брак) та поточний журнал системних подій. Асинхронна реалізація потоку відео запобігає зависанню GUI-елементів.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Отже, у першому розділі визначено ключові фактори дефектації продукції. На основі детального аналізу технологічного процесу кондитерського виробництва встановлено, що критичним етапом є контроль якості покриття виробів. Обґрунтовано необхідність автоматизації цього етапу для усунення людського фактора та мінімізації відсотка пропускання браку в пакувальну тару.

Обґрунтовано вибір апаратного комплексу через проведений порівняльний аналіз сучасних засобів автоматизації. Для реалізації логіки реального часу та керування виконавчою пневматикою Festo обрано ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200. Для виконання ресурсомістких завдань комп'ютерного зору та нейромережевого аналізу обрано обчислювальний ШІ-хаб NVIDIA Jetson Orin Nano, що забезпечує ідеальний баланс продуктивності та енергоефективності.

Сформовано вимоги до оптичного тракту та доведено перевагу використання промислової камери Basler ace 2 із технологією глобального затвора перед стандартними CMOS-сенсорами, що дозволяє уникнути геометричних спотворень об'єктів при високій швидкості руху конвеєра.

У другому розділі створено покрокову логіку взаємодії компонентів. Розроблено та деталізовано наскрізний алгоритм функціонування системи сортування: від моменту перетину виробом променя оптичного датчика Omron до фізичної відбраковки струменем стисненого повітря. Описано механізм розподілу завдань між пристроями, де ПЛК Siemens бере на себе функцію диспетчера польового рівня (генерація апаратного тригера камери, відлік таймера затримки руху конвеєра), тоді як NVIDIA Jetson виступає аналітичним ядром системи.

Синтезована підсистема технічного зору, що базується на промисловій цифровій відеокамері Basler ace 2 із технологією глобального затвора, об'єктиві Computar та дифузному безвідблисковому купольному освітлювачі CCS, гарантує отримання висококонтрастних, чітких та стабільних зображень об'єктів у русі. Це створює надійне інформаційне підґрунтя для безпомилкової роботи алгоритмів

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розпізнавання. Обчислювальним ядром верхнього рівня обрано модуль NVIDIA Jetson Orin Nano 8GB, апаратні потужності якого (до 40 TOPS) забезпечують безперебійний паралельний інференс нейромережевих моделей та фільтрацію зображень без накопичення системних затримок.

Для забезпечення абсолютної часової детермінованості фізичних процесів у контур керування інтегровано програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1212C). Працюючи в тандемі з високошвидкісним оптичним датчиком присутності Omron E3Z-D61 та надшвидкодіючим пневматичним електромагнітним клапаном Festo MHE2-MS1H, ПЛК утворює безвідмовний виконавчий тракт. Застосовані компоненти дозволяють із мікросекундною точністю синхронізувати процеси фіксації виробу, генерації тригера для камери, відліку часу затримки та безпосереднього фізичного відбракування некондиційної продукції.

Таким чином, обраний комплекс технічних засобів повністю відповідає завданням проекту та сучасним стандартам промислової автоматизації. Інтеграція інноваційних методів машинного зору з надійною індустріальною пневматикою та сенсорикою забезпечує високу пропускну здатність лінії, повністю усуває суб'єктивізм людського фактора та гарантує стабільно високу якість вихідного контролю продукції.

У третьому розділі розроблено алгоритм роботи системи автоматизації сортування на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору. Архітектура алгоритму побудована на базі апаратного переривання та блокуючих викликів, що дозволило оптимізувати часові інтервали та гарантувати, що команда на ежекцію надійде на пневмоклапан саме в момент позиціонування бракованого виробу навпроти сопла.

Впроваджено модульну структуру програмного забезпечення. Написано повноцінний програмний комплекс мовою Python, який декомпоновано на незалежні сервіси, що дозволило ізолювати логіку взаємодії з драйверами Pyruyon (камера) та Snap7 (ПЛК через PROFINET), забезпечивши високу гнучкість коду для подальшого масштабування.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблено та протестовано графічну панель оператора, де за допомогою бібліотек створено інтерактивний промисловий дашборд. У вікно програми інтегровано живий відеопотік високої частоти кадрів з OpenCV, систему кольорового маркування робочих зон ІІІ, цифрові лічильники загальної продуктивності та журнал системних логів реального часу.

Завдяки правильній організації головного циклу через механізм внутрішніх таймерів графічної оболонки, вдалося розділити потоки отримання кадрів та обробки сигналів керування. Програма працює без зависань GUI-елементів, демонструє стійкість до збоїв та безпечно вивільняє системні ресурси й порти зв'язку при зупинці конвеєра.

					<i>КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ</i>	Арк.
						60
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Machine Vision Based Techniques for Automatic Mango Fruit Sorting and Grading Based on Maturity Level and Size. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-02315-1_2 (дата звернення: 08.04.2026).
2. Building a Computer Vision Assisted Pill Inspection System. URL: <https://blog.roboflow.com/computer-vision-pill-inspection-quality-assurance/> (дата звернення: 08.04.2026).
3. ДСТУ EN 61131-3:2023. Контролери програмовані. Частина 3. Мови програмування (EN 61131-3:2013, IDT; IEC 61131-3:2013, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023.
4. ISO/IEC 22989:2022. Information technology – Artificial intelligence – Artificial intelligence concepts and terminology. Geneva : International Organization for Standardization, 2022. 51 p.
5. ISO/IEC 23053:2022. Framework for Artificial Intelligence (AI) Systems Using Machine Learning (ML). Geneva : International Organization for Standardization, 2022. 41 p.
6. *GigE Vision Standard. Version 2.2 / AIA – Advancing Vision + Imaging*. Ann Arbor, 2022.
7. *SIMATIC S7-1200 Programmable controller: System Manual / Siemens AG*. Nuremberg, 2024. 1894 p. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109797241> (дата звернення: 02.06.2026).
8. *NVIDIA Jetson Orin Nano Developer Kit User Guide / NVIDIA Corporation*. Santa Clara, 2023. URL: <https://developer.nvidia.com/embedded/learn/jetson-orin-nano-devkit-user-guide> (дата звернення: 02.06.2026).
9. *NVIDIA Jetson Linux Developer Guide / NVIDIA Corporation*. Santa Clara, 2024. URL: <https://docs.nvidia.com/jetson/archives/> (дата звернення: 02.06.2026).

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. *Basler pylon Camera Software Suite Product Documentation* / Basler AG. Ahrensburg, 2023. URL: <https://docs.baslerweb.com/pylon> (дата звернення: 02.06.2026).
11. *PROFINET System Description. Technology and Application* / PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. (PNO). Karlsruhe, 2021. 38 p.
12. *E3Z Series Photoelectric Sensors Datasheet* / Omron Corporation. Kyoto, 2022.
13. *Festo Pneumatic Cylinders and Directional Control Valves Catalog* / Festo SE & Co. KG. Esslingen, 2023.
14. Jocher G., Chaurasia A., Qiu J. *YOLO by Ultralytics* [Електронний ресурс]. 2023. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата звернення: 02.06.2026).
15. *OpenCV 4.x Documentation: Open Source Computer Vision Library* [Електронний ресурс]. 2024. URL: <https://docs.opencv.org/4.x/> (дата звернення: 02.06.2026).
16. *Python 3.11 Documentation* [Електронний ресурс] / Python Software Foundation. 2023. URL: <https://docs.python.org/3.11/> (дата звернення: 02.06.2026).
17. *Tkinter – Python interface to Tcl/Tk* [Електронний ресурс] / Python Software Foundation. 2024. URL: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html> (дата звернення: 02.06.2026).
18. *Pillow (PIL Fork) Documentation* [Електронний ресурс]. 2024. URL: <https://pillow.readthedocs.io/> (дата звернення: 02.06.2026).
19. *Snap7 Project. Open source Siemens S7 communication library* [Електронний ресурс]. 2023. URL: <https://snap7.sourceforge.net/> (дата звернення: 02.06.2026).
20. *NVIDIA TensorRT Documentation* [Електронний ресурс] / NVIDIA Corporation. 2024. URL: <https://docs.nvidia.com/deeplearning/tensorrt/> (дата звернення: 02.06.2026).
21. *Pypylon: The official Python wrapper for the Basler pylon Camera Software Suite* [Електронний ресурс]. 2024. URL: <https://github.com/basler/pypylon> (дата звернення: 02.06.2026).

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

22. *NumPy Documentation* [Електронний ресурс] / NumPy Developers. 2024. URL: <https://numpy.org/doc/stable/> (дата звернення: 02.06.2026).
23. Пупена О. М., Ельперін І. В., Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах. Київ : Ліра-К, 2020. 452 с.
24. Жученко А. І., Цапар В. С. Автоматизація технологічних процесів та робототехнічні комплекси. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 240 с.
25. Тимошук О. М., Прокопов О. В. Автоматизація процесів сортування продукції з використанням технічного зору. *Технічна інженерія*. 2022. № 1(89). С. 112–118.
26. Снігур О. В., Безносик Ю. О. Застосування згорткових нейронних мереж для розпізнавання образів у промисловості. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34 (73), № 2. С. 88–94.
27. Wang C. Y., Bochkovskiy A., Liao H. Y. M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2023. P. 7464–7475.
28. Bochkovskiy A., Wang C. Y., Liao H. Y. M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection. *arXiv preprint arXiv:2004.10934*. 2020.
29. Li Y., Gu S., Zhang C., Zheng B. Surface Defect Detection Method Based on Improved YOLOv5. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 19. P. 7415.
30. Wang J., Chen Q., Zheng S. An Improved YOLOv8 Network for Industrial Defect Detection. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 16. P. 9210.
31. Chen Y., Ding Y., Zhao F., Zhang E., Wu R. Surface Defect Detection Methods for Industrial Products: A Review. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 116565–116585.
32. Zhu X., Lyu S., Wang X., Zhao Q. TPH-YOLOv5: Improved YOLOv5 Based on Transformer Prediction Head for Object Detection on Drone-captured Scenarios.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2021. P. 2778–2788.

33. Bhargava A., Bansal A. Fruits and vegetables quality evaluation using computer vision: A review. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences.* 2022. Vol. 34, no. 6. P. 2435–2457.

34. Kumar M., Saini R. Intelligent Conveyor Belt Sorting System Using Deep Learning. *Journal of Real-Time Image Processing.* 2023. Vol. 20, no. 4. P. 72–85.

35. Bolton W. Programmable Logic Controllers. 7th ed. Oxford : Newnes, 2021. 428 p.

36. Minichino J., Howse J. Learning OpenCV 4 Computer Vision with Python 3. 3rd ed. Birmingham : Packt Publishing, 2020. 344 p.

37. Mittal S. A Survey on Embedded Systems for Deep Learning. *ACM Computing Surveys.* 2021. Vol. 53, no. 4. P. 1–37.

38. Prinz C., Morik K., Varga P. Industrial Internet of Things and Edge Computing in Manufacturing. *Procedia CIRP.* 2022. Vol. 107. P. 233–238.

39. Al-Milli N. Embedded Object Detection using YOLO on NVIDIA Jetson. *International Journal of Computer Applications.* 2022. Vol. 184, no. 12. P. 19–25.

					КвРАКІТ.22099.01.07.ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Кривко Вікторія Сергіївна

Тема: Автоматизація процесу сортування товарів на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 64

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Мета кваліфікаційної роботи розробка автоматизованої системи керування сортуванням товарів на конвеєрній лінії з використанням технологій комп'ютерного зору. Використання технологій комп'ютерного зору дозволяє автоматизувати процес розпізнавання об'єктів за складними критеріями: колір, форма, розмір, наявність дефектів, що значно зменшує вплив людського фактора, знижує відсоток браку та підвищує загальну продуктивність конвеєрних ліній. Саме тому розробка автоматизованої системи сортування товарів на базі комп'ютерного зору є вельми актуальною науково-практичною задачею.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: у першому розділі визначено ключові фактори дефектації продукції. На основі детального аналізу технологічного процесу кондитерського виробництва встановлено, що критичним етапом є контроль якості покриття виробів. Обґрунтовано необхідність автоматизації цього етапу для усунення людського фактора та мінімізації відсотка пропускання браку в пакувальну тару. Обґрунтовано вибір апаратного комплексу через проведений порівняльний аналіз сучасних засобів автоматизації.

У третьому розділі було виконано програмно-апаратну реалізацію алгоритму автоматизованого сортування продукції на базі обчислювального модуля NVIDIA Jetson Orin Nano та програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200.

4. Позитивні сторони роботи: робота відзначається актуальністю тематики, обґрунтованим вибором апаратної платформи, комплексним підходом до розробки, а також практичною спрямованістю отриманих результатів для підвищення надійності експлуатації обладнання.

5. Негативні сторони роботи: недостатність експериментальної перевірки системи на реальному промисловому обладнанні.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

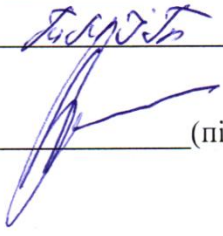
8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: добре (с/75)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи)

Бойко Юрій Вікторович, професор кафедри ЕАД

“ 10 ” 06 2026 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки
Людмилі КОРЕЦЬКІЙ
здобувачки вищої освіти
Кривко Вікторії Сергіївни
факультет ІТ, курс IV, група АКІТ-22-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомена. Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщена. Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

02.06.2026

дата



підпис

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Вікторія КРИВКО

Співавтор:

Назва: БКР Кривко

Експерт: Людмила КОРЕЦЬКА

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 0.54%

Коефіцієнт подібності 2: 0%

Мікропробіли: 11

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-10 07:45:02.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☒ Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

☐ Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

☐ Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укріплення плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-06-10



Доцент Микола Федула

Дата

експерт

Anti-Plagiarism v-15.258 (global version)

The maximum coincidence with one document 1.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 11%

ID: 274398 Title: БКР Автоматизація процесу сортування товарів на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору Added in a DB: 2026-06-09 Authors: Вікторія КРИВКО Heads: Людмила КОРЕЦЬКА Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	78722	522	2605 (3%)	36 (7%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи: «Автоматизація процесу сортування товарів на конвеєрі за допомогою комп'ютерного зору»

Автор: Кривко Вікторія Сергіївна

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Науковий керівник: Корецька Людмила Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т. ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є академічним плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноновживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках, у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає за K1 0,59%, та за K2 0 %, що з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Дата 10.06.2023

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи





Людмила КОРЕЦЬКА

Юрій ФОРКУН

Людмила КОРЕЦЬКА