

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

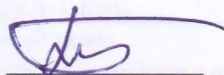
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



(підпис)

І. С. Білюк

« 15 » червня 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(код та назва спеціальності)

освітня програма

Електротехніка та електротехнології

(назва освітньої програми)

на тему:

«Сортувальний пристрій на базі робота маніпулятора»

Виконав: студент

IV курсу, групи 4317ст3

Прокоф'єв Артем Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник

асист. каф. автоматики, к.т.н, Іванов А.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

доц. каф. автоматики, Савченко О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Рецензент

доц. каф. СЕЕС, к.т.н., доц., Новогрецький С.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент



(підпис)

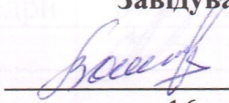
м. Миколаїв – 2026 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та
електротехніки
Кафедра автоматики
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр і назва)
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
(шифр і назва)
Освітня програма «Електромеханіка та електроенергетика»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, к.т.н.
доцент

 **О. Г. Васильєв**

« 16 » лютого 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

гр. 4317ст3

Прокоф'єв Артем Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Сортувальний пристрій на базі робота маніпулятора»
керівник роботи Іванов Антон Віталійович, кандидат технічних наук,
асистент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від « 22 » квітня 2026 року
№ 286-УЧ

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи керований об'єкт — автоматизований
сортувальний пристрій на базі багатоланкового робота-маніпулятора або
типу SCARA/Delta; тип електроприводу — сервомотори або крокові двигуни
для забезпечення точного позиціонування ланок; система ідентифікації —
система технічного зору або комплекс промислових сенсорних датчиків для
розпізнавання характеристик об'єктів; виконавчий механізм — механічний,
вакуумний або магнітний захватний пристрій; апаратна база керування —
мікроконтролер (Arduino, ESP32) або ПЛК

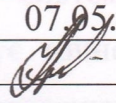
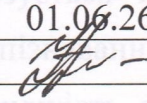
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) 1 Аналіз робототехнічних систем для сортування об'єктів, огляд
систем розпізнавання та захватних пристроїв. 2 Проектування та розрахунок
конструкції маніпулятора, обґрунтування вибору компонентів. 3 Розробка

математичної моделі, алгоритмів керування, логіки сортування та програмного забезпечення. 4 Охорона праці та безпека при експлуатації робототехніки.

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

1 Структурна схема автоматизованого сортувального пристрою. 2 Кінематична схема маніпулятора із зазначенням робочої зони. 3 Блок-схема алгоритму розпізнавання та класифікації об'єктів. 4 Блок-схема алгоритму логіки сортування та керування приводами. 5 План організації безпечного робочого місця з роботом-маніпулятором.

6. Консультанти розділів роботи

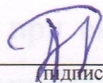
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Іванов А. В., к.т.н., асистент кафедри	07.05.26	01.06.26
			

7. Дата видачі завдання 16 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

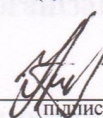
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз робототехнічних систем та методів ідентифікації об'єктів	13.04.26	
2	Проектування та розрахунок конструкції маніпулятора	23.04.26	
3	Розробка алгоритмів керування та програмного забезпечення	04.05.26	
4	Охорона праці	01.06.26	

Студент


(підпис)

Прокоф'єв А. Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Іванов А. В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Ключові слова: робот-маніпулятор, автоматизоване сортування, система технічного зору, захоплювальний пристрій, кінематика, мікроконтролер, сервопривід, алгоритм розпізнавання, безпека робототехніки.

Об'єм пояснювальної записки складає 82 аркушів, вона містить 4 розділи, 20 ілюстрацій, 4 таблиць, 28 найменувань в списку використаної літератури та 6 аркушів мультимедійної презентації.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню та проєктуванню автоматизованого сортувального пристрою на базі робота-маніпулятора для класифікації та переміщення об'єктів. Розроблена система базується на сучасній мікроконтролерній платформі та забезпечує точне розпізнавання, захоплення і просторове переміщення деталей, підвищуючи гнучкість та продуктивність виробничих ліній.

В роботі подано характеристику основних компонентів системи, таких як ланки виконавчого механізму маніпулятора, приводи для забезпечення точного позиціонування, захоплювальні пристрої, а також модулі технічного зору та сенсорні датчики для ідентифікації характеристик об'єктів. Складено структурну схему автоматизованого сортувального комплексу, розраховано кінематику та робочу зону маніпулятора, обґрунтовано вибір апаратної бази керування та механічних вузлів. Розроблено програмне забезпечення, що дозволяє керувати траєкторією руху виконавчих органів, здійснювати аналіз даних із сенсорів та координувати загальний процес сортування в реальному часі. Реалізовано алгоритми класифікації об'єктів, обчислення координат та керування просторовим переміщенням захоплювального пристрою. Для демонстрації алгоритмів роботи системи використано відповідні блок-схеми розпізнавання, логіки сортування та методи програмної реалізації. Крім того, в роботі розглянуті питання з охорони праці при експлуатації промислової робототехніки, аналізу небезпечних зон та організації безпечного робочого місця.

Додатки містять слайди мультимедійної презентації (Додаток А).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ СОРТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ.....	9
1.1.Класифікація маніпуляторів: SCARA, Delta та багатоланкові роботи...9	
1.2. Огляд сучасних систем розпізнавання об'єктів: технічний зір vs сенсорні датчики.....	13
1.3. Аналіз захватних пристроїв: механічні, вакуумні та магнітні рішення. .16	
1.4. Порівняння апаратних платформ для керування маніпуляторами.....	19
Висновки за розділом.....	20
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ МАНІПУ- ЛЯТОРА.....	22
2.1. Розробка структурної схеми сортувального пристрою.....	22
2.2. Розрахунок ступенів вільного ходу та робочої зони маніпулятора.....	24
2.3. Обґрунтування вибору компонентів.....	27
2.3.1 Вибір приводів.....	28
2.3.2 Вибір датчиків для ідентифікації характеристик об'єктів.....	31
2.3.3 Проєктування системи подачі об'єктів.....	34
2.3.4 Вибір центрального керуючого пристрою.....	37
2.4. Розробка електричної схеми підключення компонентів системи ке- рування.....	40
Висновки за розділом.....	43
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕН- НЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	45
3.1. Розробка загального алгоритму роботи сортувального пристрою.....	45
3.2. Програмування та налаштування системи технічного зору.....	51
3.3. Програмна реалізація керування маніпулятором на базі мікроконтро- лера.....	54
3.4. Часовий аналіз та побудова циклограми функціонування роботи- зованого комплексу.....	58

Висновки за розділом.....	61
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	63
4.1. Аналіз умов праці та ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	63
4.2. Технічні та організаційні заходи безпеки при експлуатації роботизованого комплексу.....	65
4.3. Забезпечення електробезпеки та пожежної безпеки виробничого приміщення.....	66
4.4. Вимоги безпеки під час технічного обслуговування та пусконаладжувальних робіт.....	68
Висновки за розділом.....	70
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74
ДОДАТОК А МУЛЬТИМЕДІЙНА ПРЕЗЕНТАЦІЯ.....	77

ВСТУП

Сучасні промислові підприємства та логістичні комплекси перебувають на етапі активної автоматизації та впровадження концепцій Індустрії 4.0, де гнучкість технологічних процесів є ключовим фактором підвищення продуктивності та конкурентоспроможності. Однією з найважливіших складових багатьох виробничих ліній (харчової, приладобудівної, пакувальної та переробної галузей) є швидке та безперебійне сортування об'єктів.

Промислові роботи-маніпулятори завдяки своїй точності, швидкодії та здатності виконувати складні просторові рухи є найбільш ефективним рішенням для цього завдання. Проте традиційні жорсткі системи автоматизації вже не задовольняють сучасні вимоги щодо гнучкості виробництва, адаптивності до зміни номенклатури деталей та інтелектуального аналізу середовища.

Актуальність даної роботи полягає у розробці сучасної, інтелектуальної системи автоматизованого сортування на базі робота-маніпулятора, яка поєднує в собі переваги технічного зору (або промислової сенсорики), точне керування приводами та адаптивні алгоритми класифікації. Використання мікроконтролерних систем керування дозволяє не лише забезпечити надійне розпізнавання та просторове позиціювання, а й створити економічно вигідний пристрій, здатний автономно ідентифікувати деталі за їх фізичними характеристиками та переміщувати у відповідні зони.

Метою даної роботи є проектування, розрахунок конструкції та розробка програмного забезпечення автоматизованого сортувального пристрою на базі робота-маніпулятора, який забезпечує швидку ідентифікацію, класифікацію та точне переміщення об'єктів.

Для досягнення цієї мети було поставлено низку завдань: – провести аналіз сучасних робототехнічних систем для сортування об'єктів, систем розпізнавання та механізмів захоплення; – розробити структурну схему сортувального комплексу та розрахувати кінематику і робочу зону

маніпулятора; – здійснити обґрунтований вибір компонентів, включаючи сервоприводи, сенсорні датчики та мікропроцесорну базу; – спроектувати систему подачі об'єктів та інтегрувати її з виконавчим механізмом; – розробити алгоритми керування, математичну модель траєкторії руху та програмне забезпечення логіки сортування; – проаналізувати вимоги з охорони праці при експлуатації промислової робототехніки.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого розпізнавання, класифікації та просторового переміщення об'єктів.

Предметом дослідження є апаратні та програмні засоби розробки системи керування сортувальним пристроєм на базі робота-маніпулятора.

Робота має як теоретичну, так і практичну цінність. Теоретичні аспекти включають розробку алгоритмів класифікації та математичне моделювання траєкторій виконавчого органу маніпулятора. Практична частина демонструє створення комплексного проєкту апаратно-програмного рішення, готового до впровадження у дрібносерійне виробництво або на пакувальні лінії.

Результати роботи можуть бути використані для модернізації існуючих сортувальних конвеєрів та створення гнучких роботизованих комірок.

Структура роботи відповідає поставленим завданням. У першому розділі проведено дослідження архітектур маніпуляторів, систем ідентифікації та захватних пристроїв. Другий розділ присвячений проєктуванню конструкції, розрахунку параметрів робочої зони та вибору апаратної бази. У третьому розділі описано розробку алгоритмів розпізнавання, керування приводами та програмного забезпечення. У четвертому розділі розглянуто вимоги з охорони праці та організації безпечного робочого місця.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ СОРТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Класифікація маніпуляторів: SCARA, Delta та багатоланкові роботи

У сучасній промисловості автоматизація сортувальних процесів безпосередньо залежить від кінематичної структури виконавчих механізмів. Вибір конкретної архітектури робота-маніпулятора визначає динамічні характеристики системи, точність позиціонування, розміри робочої зони та максимальну вантажопідйомність. Основними типами маніпуляторів, які застосовуються у гнучких виробничих осередках для переміщення штучних об'єктів, є системи типу SCARA, Delta та класичні антропоморфні багатоланкові роботи [1, 2].

Маніпулятори типу SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) мають кінематичну схему, що забезпечує вибірккову піддатливість у горизонтальній площині при високій жорсткості у вертикальному напрямку. Зазвичай така конструкція складається з двох послідовних шарнірів із паралельними вертикальними осями обертання, що забезпечують переміщення по координатах X та Y , а також третього лінійного привода для вертикального зсуву по осі Z . Така конфігурація дозволяє досягати надзвичайно високої швидкості та точності виконання операцій типу «взяти-покласти» (pick-and-place) у межах циліндричної робочої зони [3, 4]. Геометрія та структура робочого простору маніпулятора SCARA детально відображені на схематичному кресленні рисунок 1.1.

Завдяки конструктивним особливостям маніпуляторів типу SCARA, їхні приводи розташовані близько до основи, що мінімізує інерційну масу рухомих частин та дозволяє оптимізувати перехідні процеси під час розгону й

гальмування. Основною обмеженістю таких роботів є відносно малий хід по вертикальній осі та неможливість орієнтації об'єкта під довільними просторовими кутами, що обмежує їх використання завданнями, де всі операції відбуваються на паралельних плоских поверхнях.

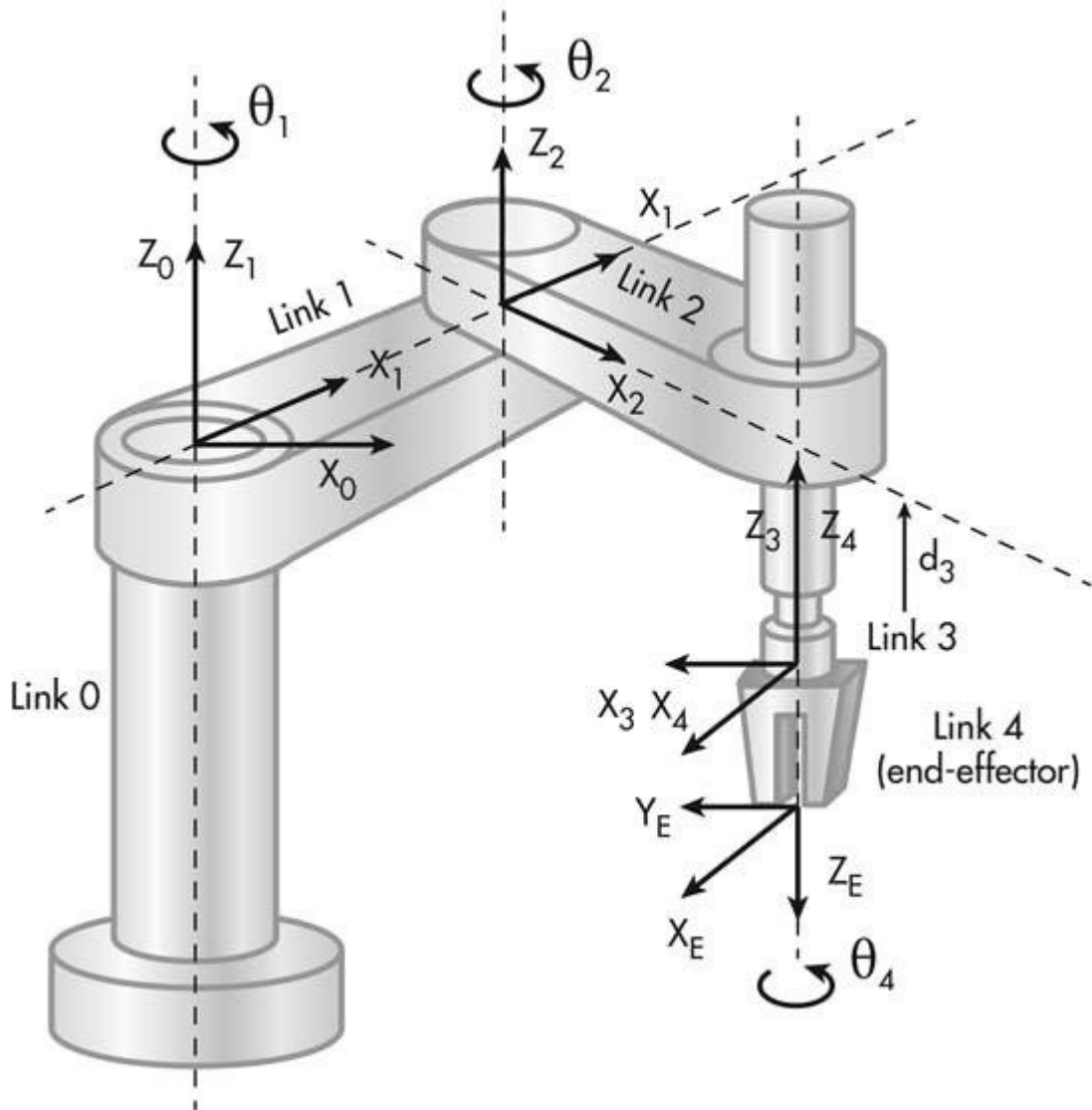


Рис 1.1 — Кінематична схема маніпулятора SCARA

Роботи типу Delta належать до класу паралельних маніпуляторів. Їхня конструкція базується на використанні просторових паралелограмів, які з'єднують нерухому основу з рухомою платформою, на якій закріплено робочий орган. Головна перевага Delta-роботів полягає в тому, що всі важкі

виконавчі двигуни встановлені нерухомо на базовій рамі, а рухомі ланки виготовляються з надлегких матеріалів, наприклад, вуглепластику. Це дозволяє досягати екстремальних показників прискорення, що часто перевищують 10G, та забезпечувати частоту циклів сортування понад 150–200 операцій за хвилину [4]. Загальний вигляд просторової структури паралельного робота представлено на рисунку 1.2.



Рис. 1.2 — Просторова структура паралельного маніпулятора типу Delta

Робоча зона паралельного маніпулятора має форму циліндра або сферичного сегмента з обмеженим радіусом дії, що вимагає точного узгодження позиції робота з конвеєрною стрічкою. Такі роботи є незамінними у високошвидкісних лініях фасування, сортування харчових продуктів, фармацевтичних виробів та дрібних електронних компонентів, де критичною

є саме швидкість обробки матеріального потоку при відносно невеликій масі окремого об'єкта [4, 5].

Антропоморфні багатоланкові роботи із послідовною кінематичною структурою мають зазвичай шість або більше ступенів вільного ходу, що забезпечує максимальну просторову гнучкість. Кожен шарнір такого маніпулятора працює як аналог людського суглоба, дозволяючи робочому органу підходити до об'єкта під будь-яким кутом. Це відкриває можливості для реалізації складних просторових траєкторій сортування, обслуговування багатоярусних стелажів або накопичувальних бункерів складної геометрії [1, 2]. Графічне представлення ступенів вільного ходу та кінематичних пар шестиосового робота наведено на рисунку 1.3.

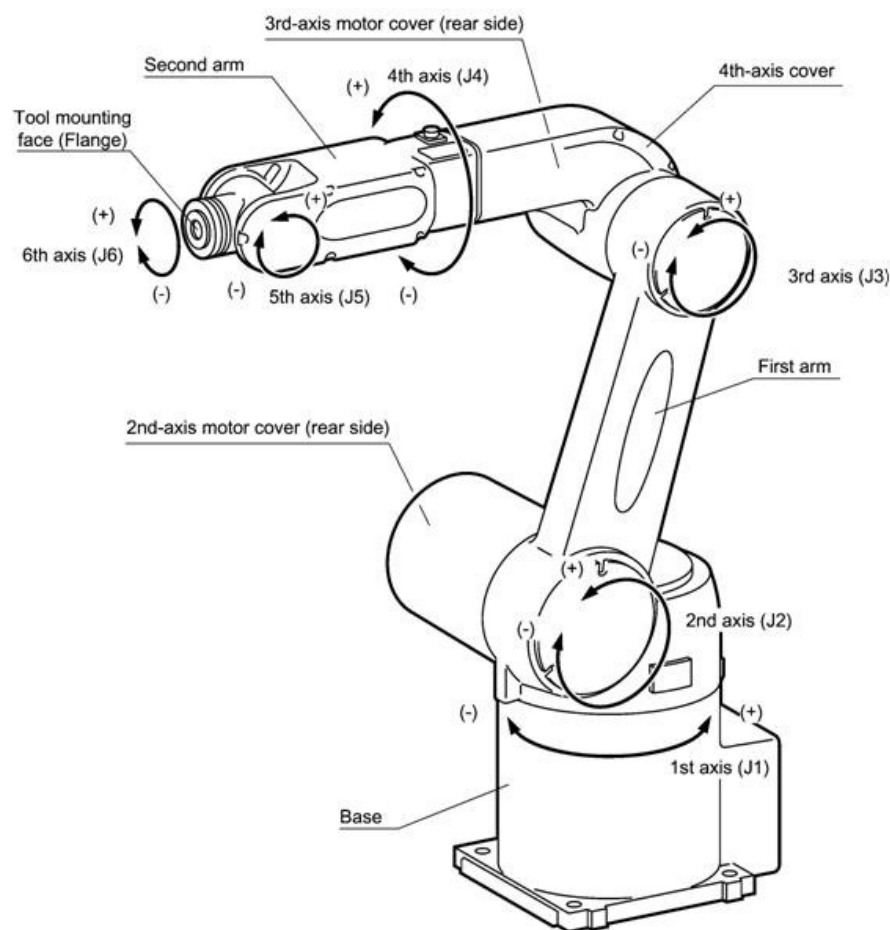


Рис. 1.3 — Кінематичні осі та ступені вільного ходу багатоланкового маніпулятора

Головним недоліком багатоланкових систем є значна інерційність рухомих елементів, оскільки кожен наступний привод є навантаженням для попереднього. Це призводить до зниження максимальної швидкості переміщення порівняно з дельта-роботами та суттєво ускладнює математичне моделювання зворотної задачі кінематики та динаміки, яка вимагає значних обчислювальних ресурсів керуючої системи для розрахунку траєкторій у реальному часі [2, 5].

1.2 Огляд сучасних систем розпізнавання об'єктів: технічний зір vs сенсорні датчики

Ефективність функціонування сортувального пристрою визначається точністю та швидкістю ідентифікації характеристик об'єктів, що підлягають обробці. У сучасній практиці проектування автоматизованих систем виділяють два концептуальних підходи до побудови інформаційно-вимірювальної підсистеми: застосування дискретних промислових сенсорів або впровадження систем комп'ютерного (технічного) зору [6, 7].

Сенсорні системи на базі комбінацій індуктивних, ємнісних, оптичних та ультразвукових датчиків будуються за принципом прямого знімання фізичних параметрів. Індуктивні датчики дозволяють миттєво визначити наявність феромагнітного матеріалу, ємнісні реагують на діелектричну проникність середовища (що дає змогу розділяти пластик та дерево), а фотоелектричні датчики дифузійного чи бар'єрного типу фіксують геометричні межі або колірні мітки за рівнем відбитого сигналу [7]. Структурна схема організації збору даних за допомогою дискретної групи сенсорів представлена на рисунку 1.4.

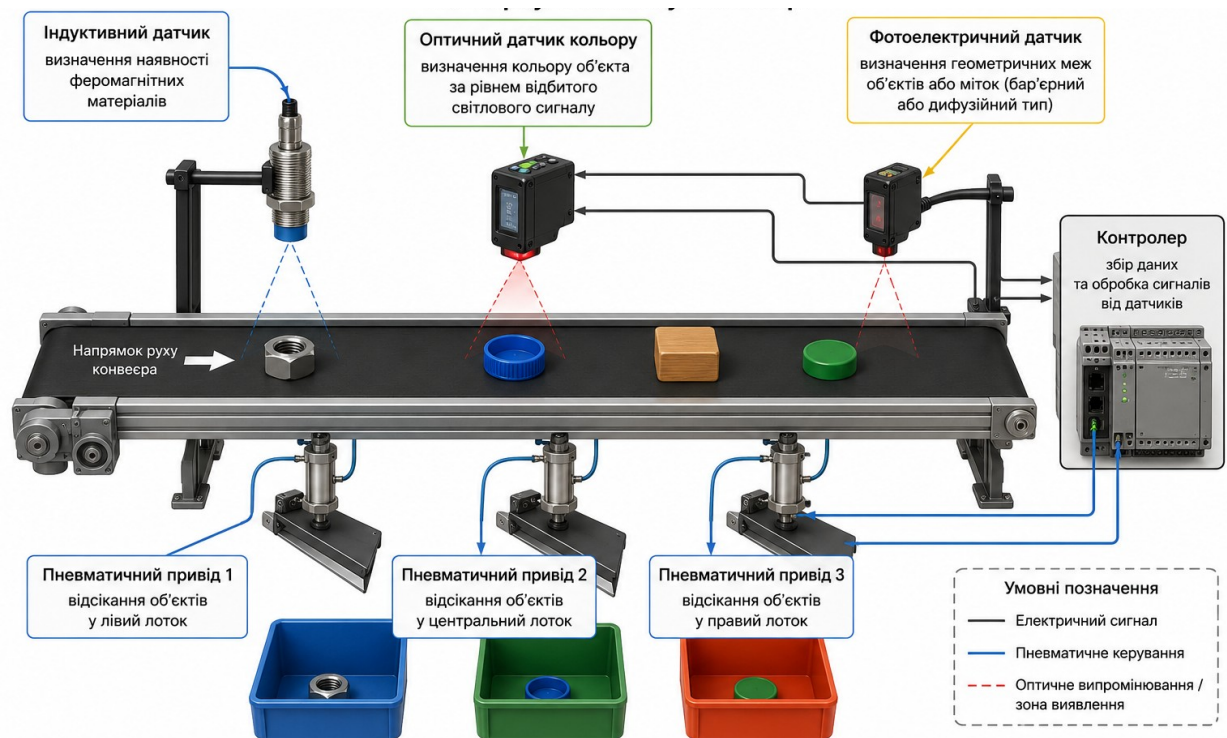


Рис. 1.4 — Схема розташування сенсорних датчиків на сортувальному конвеєрі

Перевагами використання традиційних датчиків є їхня висока надійність, швидкодія (час відгуку вимірюється мілісекундами), низька вартість елементної бази та простота програмної обробки сигналів, які зазвичай зводяться до читання цифрових або аналогових портів мікроконтролера. Проте така система є жорстко детермінованою і не здатна адаптуватися до зміни номенклатури виробів. Якщо виникає завдання сортувати об'єкти за складною формою, внутрішніми дефектами або текстовим маркуванням, можливості сенсорних датчиків виявляються недостатніми [7].

Системи технічного зору використовують цифрові камери високої роздільної здатності у поєднанні зі спеціалізованими алгоритмами обробки зображень. Інформаційний потік у цьому випадку є матрицею пікселів, яка аналізується на наявність специфічних контурів, градієнтів кольорів або текстур за допомогою методів бінаризації, фільтрації Кенні, або перетворення

Хафа [6, 8]. Загальний принцип побудови та функціонування інтелектуальної системи розпізнавання з відеокамерою проілюстровано на рисунку 1.5.

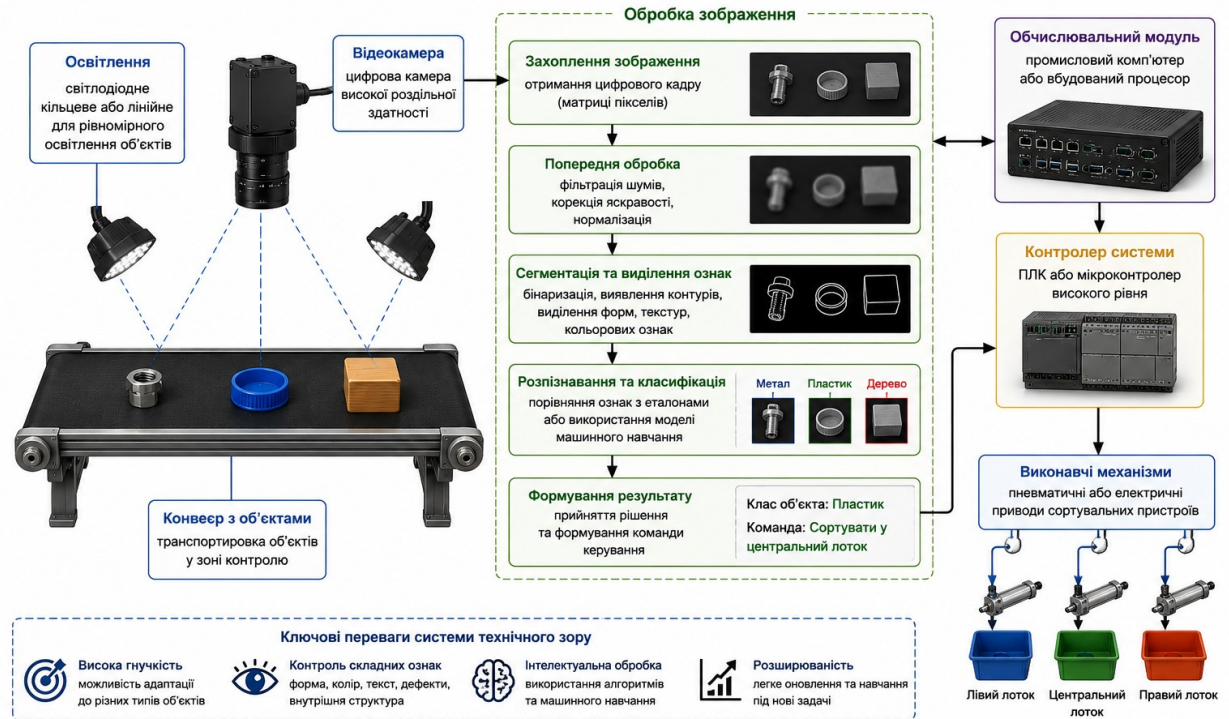


Рис. 1.5 — Функціональна архітектура системи технічного зору

Застосування технічного зору забезпечує максимальну гнучкість автоматизованого комплексу. Переналаштування системи під новий тип продукції здійснюється суто програмним шляхом без зміни фізичного розташування обладнання. Основні обмеження цього підходу пов'язані з високою чутливістю до умов зовнішнього освітлення, появою бликів на металевих поверхнях, а також необхідністю використання потужних обчислювальних платформ для обробки відеопотоку в реальному часі, що підвищує загальну вартість проекту [6, 8].

1.3 Аналіз захватних пристроїв: механічні, вакуумні та магнітні рішення

Захватний пристрій (ендефектор) є кінцевою ланкою робота-маніпулятора, яка безпосередньо взаємодіє з об'єктом маніпулювання. Конструкція схвата має забезпечувати надійне утримання деталі під час дії максимальних динамічних прискорень, не викликаючи при цьому деформації чи пошкодження поверхні виробу. За принципом дії захватні пристрої поділяють на механічні, вакуумні та магнітні [9, 10].

Механічні захватні пристрої реалізують затискання об'єкта за допомогою рухомих губок або пальців, що приводяться в дію через важільні, зубчасті чи гвинтові передачі від електричних, пневматичних або гідравлічних приводів. Залежно від геометрії губок, фіксація може відбуватися шляхом тертя (силове утримання) або завдяки геометричному охопленню деталі (формове утримання) [9]. Конструктивне виконання двопальцевого механічного схвата з електроприводом показано на рисунку 1.6.

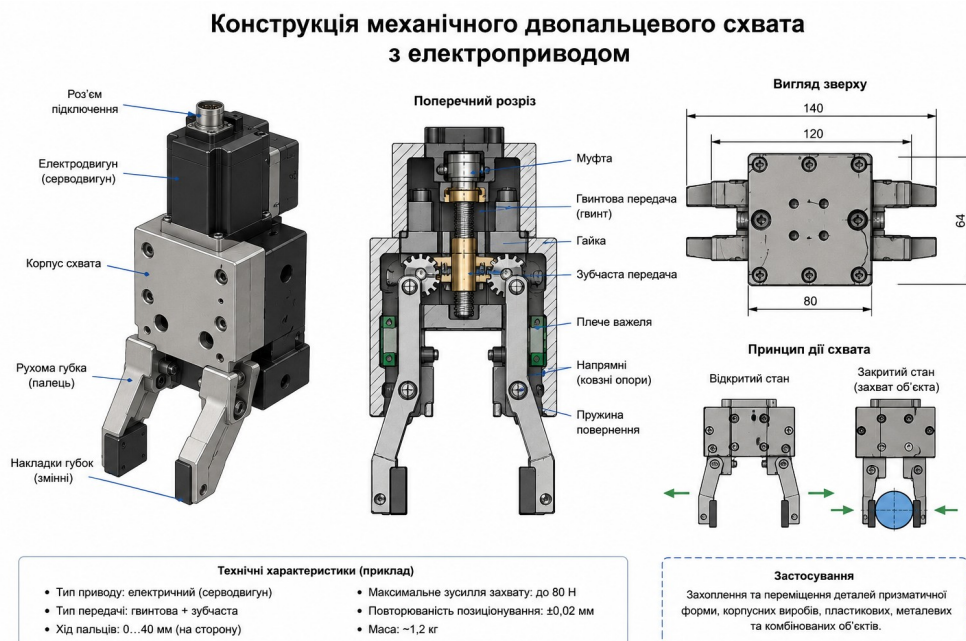


Рис. 1.6 — Конструкція механічного двопальцевого схвата з електроприводом

Механічні рішення є універсальними для утримання твердих тіл із чітко визначеною геометрією, проте вони вимагають значних зусиль для точного розрахунку моменту затискання, щоб уникнути руйнування крихких об'єктів. Окрім того, зміна форми деталей часто вимагає повної заміни робочих губок.

Вакуумні захватні пристрої діють за принципом створення розрідження повітря у внутрішній порожнині еластичної присоски, яка притискається до поверхні об'єкта. Вакуум може генеруватися за допомогою компактних вакуумних насосів або ейжекційних систем, що працюють на базі ефекту Вентурі при подачі стисненого повітря. Цей тип ендефекторів є ідеальним для маніпулювання об'єктами з плоскою, гладкою та великою за площею поверхнею, такими як листовий метал, скло, картонні коробки чи плити ДСП [10]. Типова схема ейжекційної вакуумної системи утримання наведена на рис.1.7.

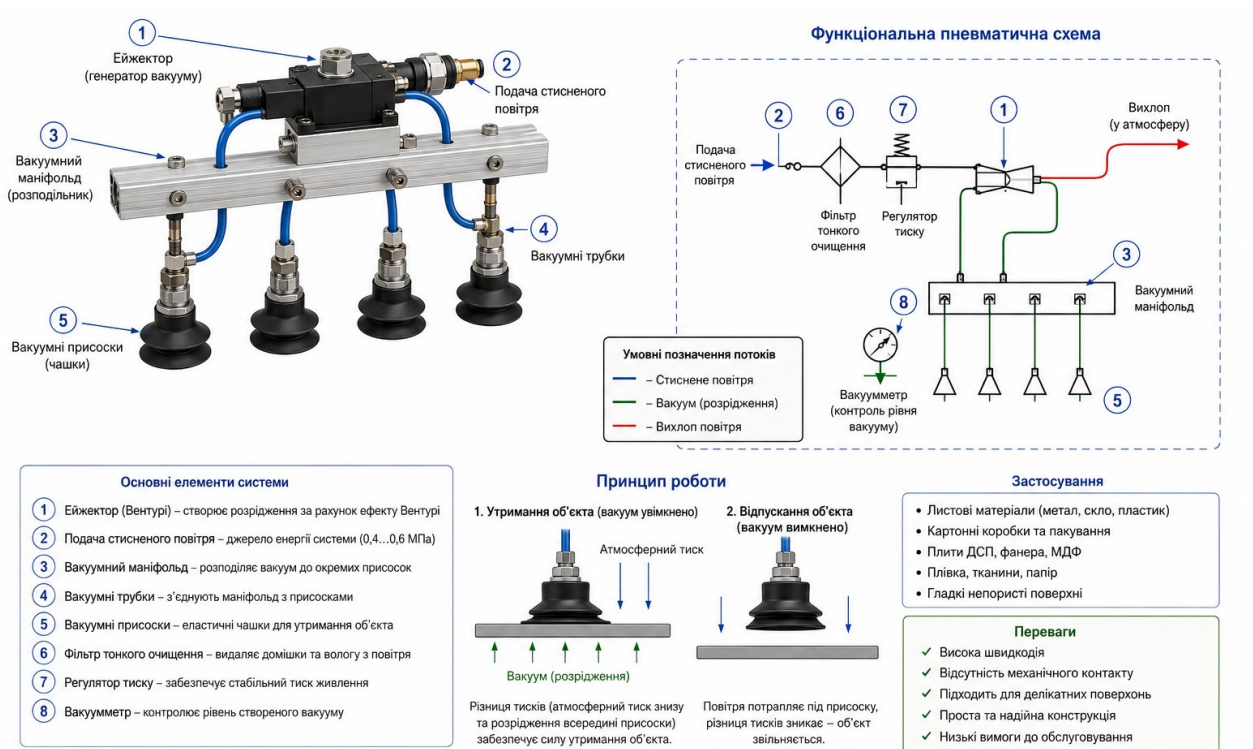


Рис. 1.7 — Схема вакуумного захватного пристрою з ейжектором

Вакуумні схвати забезпечують м'який контакт із виробом, мінімізуючи ризик механічних пошкоджень, і мають надзвичайно низьку власну масу. Головним обмеженням є неможливість роботи з пористими, шорсткими або сильно вигнутими поверхнями, де неможливо досягти герметизації вакуумного контуру.

Магнітні захватні пристрої використовуються виключно для транспортування об'єктів, виготовлених із феромагнітних матеріалів. Вони поділяються на системи з постійними магнітами (де відпускання деталі реалізується механічним відведенням магніту) та електромагнітні пристрої, керування якими здійснюється шляхом комутації струму в обмотці котушки [9, 10]. Архітектура промислового електромагнітного схвата представлена на рисунку 1.8.

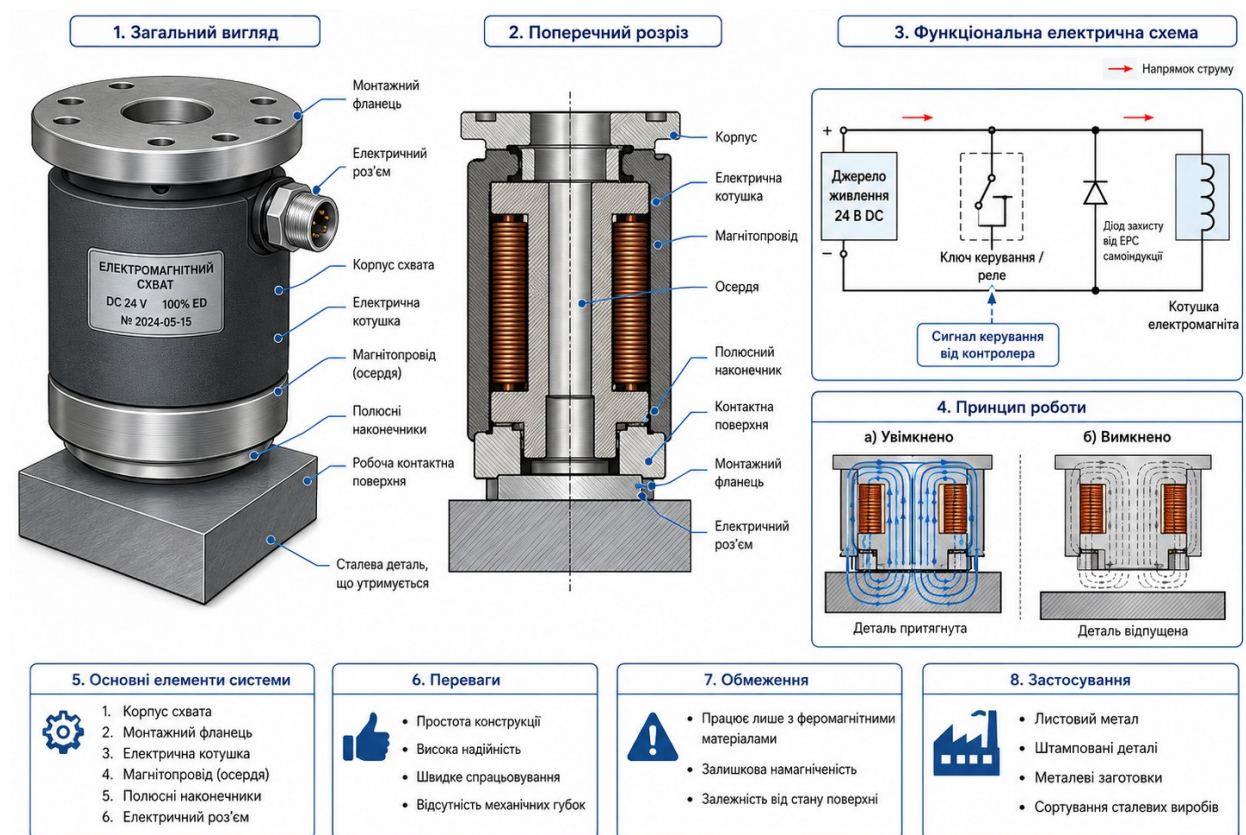


Рис. 1.8 — Архітектура промислового електромагнітного схвата

Магнітні схвати мають високу питому вантажопідйомність, конструктивну спрощеність та високу швидкість спрацьовування. До їхніх недоліків належать залишковий магнетизм, який може заважати відпусканню легких деталей, поступове нагрівання котушок під час тривалої роботи, а також повна непридатність для сортування виробів із кольорових металів, пластику чи полімерів.

1.4 Порівняння апаратних платформ для керування маніпуляторами

Проектування системи керування роботом-маніпулятором вимагає вибору апаратної платформи, здатної забезпечити обробку вхідних сигналів сенсорів, розрахунок кінематичних рівнянь та формування високочастотних керуючих сигналів для приводів (ШИМ, Step/Dir або мережеві протоколи) [11, 12].

Мікроконтролери загального призначення та сокети для розробників, такі як блоки на базі архітектур Arduino (AVR), ESP32 (Xtensa) або STM32 (ARM Cortex-M), відрізняються низькою вартістю та прямим доступом до апаратних периферійних модулів (таймерів, АЦП, інтерфейсів SPI/I2C) [11]. Платформа ESP32, завдяки наявності двоядерного процесора та інтегрованих модулів бездротового зв'язку, дозволяє ефективно розділяти завдання низькорівневого керування кроковими двигунами чи сервоприводами в реальному часі (використовуючи операційні системи типу FreeRTOS) та високорівневого обміну даними через веб-інтерфейси. Проте обмежений об'єм оперативної пам'яті та відсутність спеціалізованих апаратних блоків обробки матриць роблять ці мікроконтролери малопридатними для складних обчислень у системах із тривимірним технічним зором [11, 13].

Промислові програмовані логічні контролери (ПЛК) орієнтовані на максимальну надійність, завадостійкість та детермінованість часу виконання робочого циклу в умовах жорсткого промислового середовища. Вони підтримують стандартизовані мови програмування IEC 61131-3 (LAD, FBD, SCL) і мають розвинені засоби самодіагностики та захисту від апаратних збоїв. Використання ПЛК є доцільним при побудові великих виробничих систем, де маніпулятор є частиною загальної конвеєрної лінії, проте вартість таких контролерів та спеціалізованих модулів розширення для керування рухом (Motion Control) є високою, а інтеграція сторонніх нестандартних алгоритмів технічного зору суттєво ускладнена [12].

Для побудови сучасних інтелектуальних сортувальних роботів найчастіше використовують гнучкий комбінований підхід. Обчислення алгоритмів розпізнавання образів та планування просторових траєкторій покладається на одноплатні комп'ютери або спеціалізовані мікропроцесорні платформи з підтримкою нейромережевих прискорювачів (наприклад, архітектури типу NVIDIA Jetson або Raspberry Pi), тоді як завдання генерації точних часових імпульсів для сервомоторів передаються на виконавчі мікроконтролери через швидкісні шини зв'язку [11-13].

Висновки за розділом

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексний аналіз сучасних робототехнічних систем, призначених для автоматизації процесів сортування. Дослідження кінематичних архітектур маніпуляторів показало, що вибір виконавчого механізму безпосередньо залежить від виробничих умов та характеристик вантажу. Для високошвидкісних ліній обробки легких об'єктів найефективнішими є паралельні роботи типу Delta, тоді як для локальних завдань переміщення деталей у горизонтальній площині найвищу результативність за критеріями вартості та точності

позиціювання демонструють системи архітектури SCARA. Антропоморфні багатоланкові роботи забезпечують максимальну просторову гнучкість, однак мають певні обмеження щодо граничної швидкодії через значну інерційність послідовно з'єднаних ланок.

Аналіз інформаційно-вимірювальних підсистем підтвердив, що використання традиційних дискретних промислових сенсорів залишається виправданим для детермінованих процесів із чітко фіксованою номенклатурою виробів завдяки їхній високій надійності та швидкодії. Натомість для реалізації гнучких автоматизованих комірок, здатних розпізнавати об'єкти складної геометрії, виявляти поверхневі дефекти або здійснювати багатокритеріальну класифікацію, обов'язковою є інтеграція систем технічного зору, незважаючи на їхні підвищені вимоги до обчислювальних потужностей. Вивчення типів захватних пристроїв довело, що їхня конструкція має бути чітко адаптована до фізико-механічних властивостей деталей: вакуумні ендефектори є найменш травматичними для гладких поверхонь, механічні гарантують надійне силове утримання жорстких елементів, а електромагнітні є найбільш швидкодіючими при маніпулюванні феромагнітними матеріалами.

За результатами огляду систем керування встановлено, що для проєктування малогабаритних сортувальних пристроїв раціонально використовувати сучасні високопродуктивні мікроконтролерні платформи. Вони дозволяють реалізувати комбіновану архітектуру, яка успішно поєднує жорстко детерміноване формування керуючих імпульсів для просторового переміщення сервоприводів із гнучкими алгоритмами первинної обробки сенсорних даних та можливостями бездротової інтеграції в промислові інформаційні мережі.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ МАНІПУЛЯТОРА

2.1. Розробка структурної схеми сортувального пристрою

Проектування будь-якої складної автоматизованої системи починається з побудови її структурної схеми, яка визначає склад функціональних блоків, їхнє цільове призначення та характер взаємозв'язків між ними. Для роботизованого сортувального комплексу структурна архітектура має забезпечувати безперебійний потоковий обмін інформацією між підсистемою збору даних, центральним обчислювальним ядром та підсистемою виконавчих механізмів. Окрім інформаційних зв'язків, важливе місце в структурі займають канали розподілу електричної енергії, які забезпечують стабільне живлення як слабкострумівих мікропроцесорних компонентів, так і силових електроприводів.

Основою запроєктованої структури є центральний керуючий пристрій, виконаний на базі високопродуктивного 32-бітного мікроконтролера. На нього покладаються завдання опитування сенсорів, програмної фільтрації шумів, реалізації алгоритмів детермінованого керування рухом ланок маніпулятора в реальному часі, а також координація роботи допоміжних пристроїв [14]. Взаємодія елементів системи на системному рівні детально відображена на структурній схемі автоматизованого сортувального комплексу (рис. 2.1).

Інформаційно-вимірювальна підсистема, що підключається до входних портів обчислювального ядра, складається з датчиків первинної ідентифікації об'єктів та сенсорів зворотного зв'язку. Датчики первинної ідентифікації, встановлені на лінії подачі, фіксують геометричні або оптичні ознаки деталей і передають відповідні сигнали на контролер для подальшої класифікації.

Сенсори зворотного зв'язку, такі як енкодери приводів або кінцеві вимикачі, необхідні для моніторингу поточного просторового стану ланок маніпулятора, запобігання виходу механічних елементів за межі робочого простору та забезпечення високої точності позиціювання [15, 16].

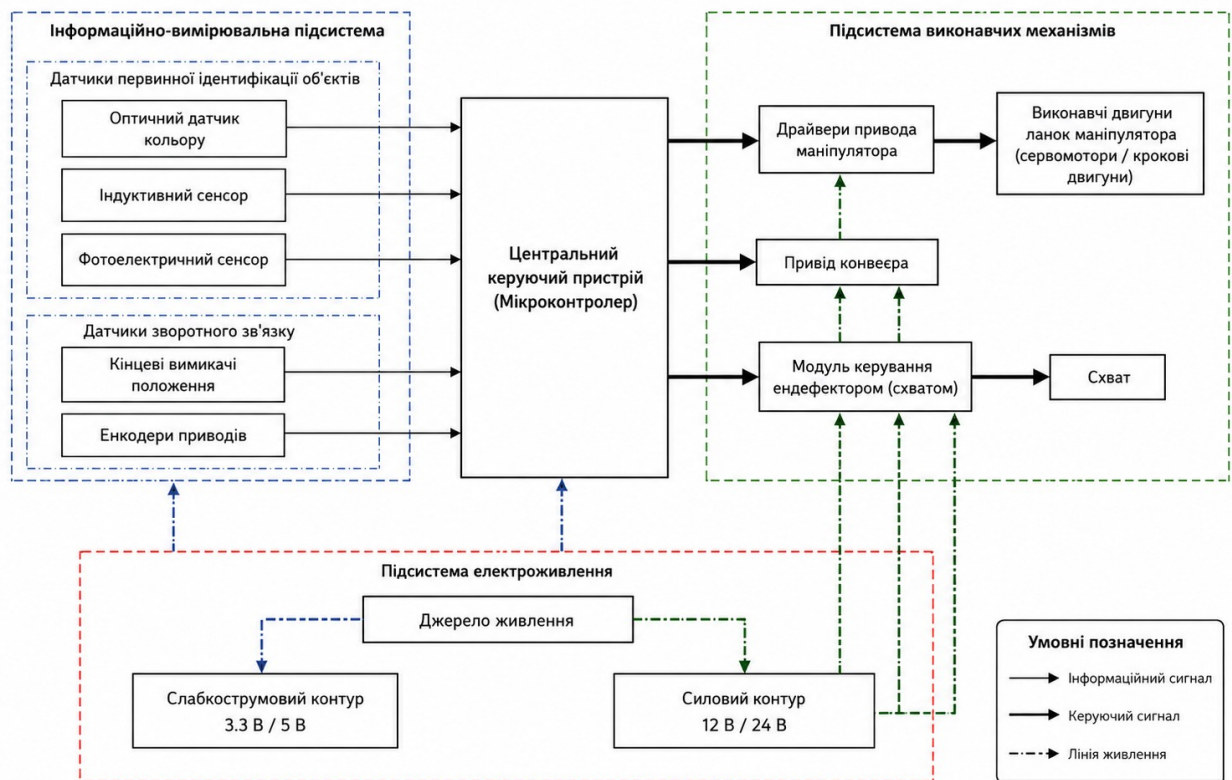


Рис. 2.1 — Структурна схема автоматизованого сортувального пристрою

Підсистема виконавчих механізмів включає в себе драйвери приводів, виконавчі двигуни ступенів вільного ходу, привід системи подачі об'єктів та пристрій керування ендефектором. Оскільки безпосереднє підключення потужних електродвигунів до делікатних виводів мікроконтролера є неможливим через значні струмові навантаження, у структурі передбачено використання проміжних силових підсилювачів — драйверів. Вони трансформують низьковольтні керуючі сигнали контролера у потужні імпульси струму, необхідні для комутації обмоток двигунів. Керування ендефектором здійснюється через окремий комутаційний модуль, який

адаптує вихідний сигнал процесора до фізичного принципу дії схвата [15, 17].

Особливе значення при розробці структурної схеми приділено підсистемі електроживлення. Вона будується за принципом розділення силових та логічних контурів для мінімізації впливу комутаційних завад, що виникають під час роботи двигунів, на стабільність функціонування мікропроцесорної техніки. Центральний блок живлення перетворює первинну напругу промислової або побутової мережі у фіксовані рівні постійного струму, які через спеціалізовані модулі фільтрації та стабілізації розподіляються по відповідних гілках системи [14, 17, 20].

2.2. Розрахунок ступенів вільного ходу та робочої зони маніпулятора

Проектування механічної системи сортувального робота вимагає точного математичного визначення його рухомості та геометричних меж простору, в якому він здатний виконувати технологічні операції. Вибрана для розробки архітектура маніпулятора SCARA оптимізована для швидких переміщень у горизонтальній площині та вертикального виконання операцій захоплення і розміщення (pick-and-place) [21].

Кількість ступенів вільного ходу (рухомість механізму) визначає незалежні координати, необхідні для однозначного задання положення робочого органу в просторі [21, 22]. Для просторових механізмів розрахунок рухомості W здійснюється за структурною формулою Сомова-Малишева:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \quad (2.1)$$

де n — кількість рухомих ланок механізму; p_i — кількість кінематичних пар i -го класу (де індекс класу вказує на кількість обмежень (зв'язків), що накладаються на відносний рух ланок).

Кінематична схема маніпулятора SCARA містить $n = 4$ рухомі ланки: перше плече, друге плече, вертикальний вал та фланець ендефектора. З'єднання між базою та першим плечем, а також між першим і другим плечем реалізовані через обертальні шарніри з вертикальними осями. Вертикальне переміщення вала забезпечується поступальною (трансляційною) парою, а орієнтація схвата — додатковим обертальним рухом. Усі перелічені з'єднання належать до кінематичних пар п'ятого класу (залишають лише один ступінь свободи), отже $p_5 = 4$, а пари інших класів відсутні. Підставивши ці значення у формулу, отримуємо:

$$W = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 4 = 24 - 20 = 4 \quad (2.2)$$

Отриманий результат підтверджує, що маніпулятор має чотири ступені вільного ходу. Три з них забезпечують просторове позиціонування (координати x , y , z), а четвертий дозволяє керувати кутовою орієнтацією об'єкта (наприклад, для правильного розміщення деталі в лотку).

Робоча зона маніпулятора — це простір, кожна точка якого може бути досягнута базовою точкою захоплювального пристрою. Геометрично робоча зона робота SCARA являє собою частину порожнистого циліндра. Розрахунок меж цієї зони у горизонтальній площині базується на розв'язанні прямої задачі кінематики [21, 22]. Положення робочого органу в декартовій системі координат визначається за допомогою тригонометричних рівнянь:

$$x = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.3)$$

$$y = L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.4)$$

де L_1 та L_2 — довжини першого та другого плеча відповідно; θ_1 — кут повороту першого плеча відносно базової осі; θ_2 — кут повороту другого плеча відносно першого.

Максимальний радіус досяжності R_{max} , який визначає зовнішню межу робочої зони, досягається за умови повного випрямлення обох ланок, коли $\theta_2 = 0$:

$$R_{max} = L_1 + L_2 \quad (2.5)$$

Внутрішня межа робочої зони (так звана «мертва зона», недоступна для маніпулятора через його конструктивні обмеження) визначається модулем різниці довжин ланок, коли вони складені одна на одну ($\theta_2 = \pi$):

$$R_{min} = |L_1 - L_2| \quad (2.6)$$

Фактична площа робочої зони S у горизонтальній площині розраховується з урахуванням механічних обмежень кутів повороту приводів. Якщо припустити, що перший шарнір може обертатися на кут $\Delta\theta_1$ (у градусах), площа перерізу робочого простору складатиме:

$$S = \frac{\Delta\theta_1}{360^\circ} \pi (R_{max}^2 - R_{min}^2) \quad (2.7)$$

Об'єм робочого простору V отримується множенням площі S на величину максимального вертикального ходу механізму (координата z), що позначається як d_3 :

$$V = S \cdot d_3 \quad (2.8)$$

Проведені кінематичні розрахунки є фундаментальними для наступного етапу проєктування. Визначені радіуси $R_{\max}$ та $R_{\min}$ будуть використані для правильного просторового позиціювання маніпулятора відносно сортувального конвеєра, що гарантуватиме безперешкодне захоплення об'єктів без виходу механізму за межі його математичної моделі (рис. 2.2) [21, 22].

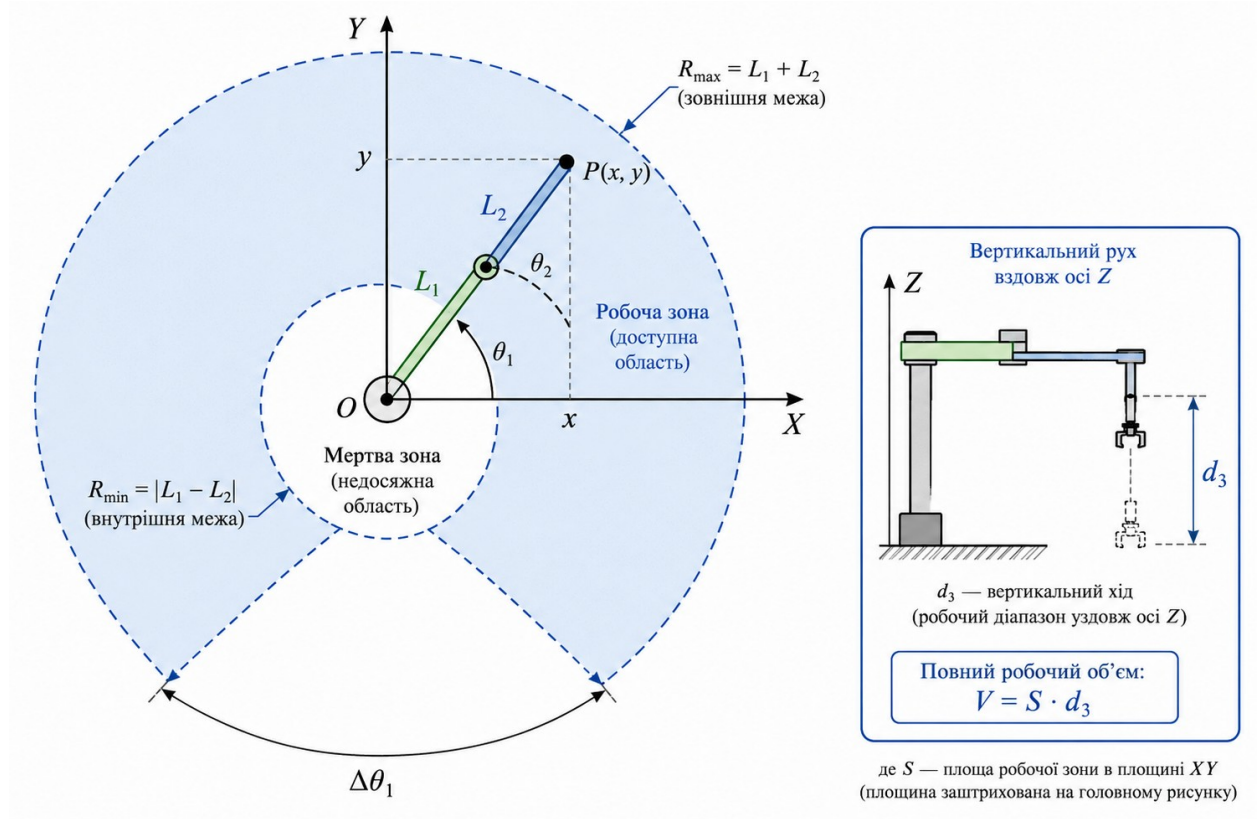


Рис. 2.2 — Геометрична модель робочої зони маніпулятора SCARA в декартових координатах

2.3 Обґрунтування вибору компонентів

Комплексне проєктування роботизованого пристрою неможливе без обґрунтованого вибору його апаратної бази. Ефективність функціонування системи сортування прямо залежить від динамічних характеристик приводів, точності сенсорного обладнання та надійності допоміжних механізмів подачі.

Усі елементи повинні працювати як єдиний узгоджений організм, забезпечуючи високу швидкість обробки об'єктів без втрати точності.

2.3.1 Вибір приводів

Для забезпечення високої динаміки, точності позиціювання та надійності роботи перших двох ланок маніпулятора SCARA, які несуть основне радіальне та інерційне навантаження під час швидкісного сортування, було обрано промисловий синхронний сервомотор змінного струму виробництва компанії Delta Electronics серії ECMA-C20604RS у комплекті з цифровим драйвером ASDA-B2 (рис.2.3) [15, 16].

Вибір конкретно цього виконавчого елемента зумовлений жорсткими вимогами до координації рухів у замкненому контурі. На відміну від класичних крокових двигунів, цей сервомотор повністю виключає ризик пропуску кроків при екстремальних гальмуваннях та прискореннях, що є критично важливим для безперебійного виконання операцій типу «взяти-покласти» (pick-and-place) на конвеєрній лінії [15, 16].



Рис. 2.3 — Зовнішній вигляд та габаритне креслення сервомотора Delta Electronics ECMA-C20604RS

Технічне обґрунтування застосування сервомотора Delta ECMA-C20604RS у проєктованій системі базується на комплексі взаємопов'язаних інженерних факторів, серед яких визначальною є висока роздільна здатність апаратури зворотного зв'язку. Завдяки інтеграції вбудованого 17-бітного інкрементального енкодера, що генерує 131072 імпульсів на один оберт, система керування здатна контролювати кутове положення ланки з точністю до часток градуса, гарантуючи повторюваність просторового позиціонування ендефектора маніпулятора в жорстких межах $\pm 0,02$ мм [15, 16].

Важливою динамічною перевагою обраного приводу є оптимальне співвідношення крутного моменту та власної інерції ротора. Попри те, що номінальний момент двигуна становить 1,27 Н·м, його конструкція допускає короткочасне трикратне пікове перевантаження до 3,82 Н·м, що дозволяє виконавчому механізму миттєво долати сили інерції спокою під час старту з максимально витягнутим плечем і швидко стабілізуватися в точці цільового призначення без виникнення тривалих затухаючих коливань ланок.

Крім того, висока швидкодія та широкий частотний діапазон із номінальною швидкістю обертання 3000 об/хв та можливістю короткочасного розгону до 5000 об/хв у поєднанні з механічним редуктором забезпечують таку лінійну швидкість переміщення робочого органу, яка за своїми динамічними показниками суттєво перевищує експлуатаційні можливості аналогічних за масою крокових систем. Наостанок, висока промислова надійність вузла підтверджується відповідністю класу захисту корпусу стандарту IP65, що гарантує тривалу та безперебійну роботу електроприводу в умовах неминучого виробничого запилення або підвищеної вологості безпосередньо в межах сортувального осередку виробничої лінії.

Для проведення подальших інженерних розрахунків динаміки маніпулятора, перевірки контурів регулювання на стійкість та точного налаштування параметрів драйвера в замкнутому контурі керування, всі

технічні характеристики обраного виконавчого елемента підлягають обов'язковій систематизації. Повний комплекс паспортних та експлуатаційних даних безколекторного синхронного електродвигуна, що безпосередньо впливають на швидкодію та точність просторового позиціонування ланок, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Основні електромеханічні та експлуатаційні параметри сервомотора ЕСМА-С20604RS

Параметр сервомотора ЕСМА-С20604RS	Значення величини
Тип двигуна	Синхронний, безколекторний сервомотор (AC Servo)
Номінальна вихідна потужність	400 Вт
Номінальний крутний момент	1,27 Н·м
Максимальний (піковий) крутний момент	3,82 Н·м
Номінальна швидкість обертання	3000 об/хв
Максимальна швидкість обертання	5000 об/хв
Номінальний споживаний струм	2,6 А
Роздільна здатність енкодера	17-біт (131072 імп/об)
Момент інерції ротора	$0,277 \times 10^{-4}$ кг·м ²
Клас захисту корпусу	IP65
Допустима температура середовища	від 0 °С до +40 °С

Аналіз представлених у таблиці 2.1 параметрів дозволяє стверджувати, що обрана модель двигуна повністю задовольняє вимоги щодо динамічного розгону та гальмування ланок маніпулятора, а низький момент інерції ротора

в поєднанні з високою роздільною здатністю зворотного зв'язку мінімізує перерегулювання в кінцевих точках траєкторії сортування штучних об'єктів.

Для третьої осі маніпулятора (вертикальний хід Z), де навантаження має переважно статичний характер (утримання ваги схвата та об'єкта), доцільно використати гібридний кроковий двигун із замкненим контуром (кроковий сервопривід) серії NEMA 23 із вбудованим енкодером на 1000 ліній. Це дозволить зберегти високу точність вертикального опускання без ризику пропуску кроків, значно знижуючи загальну вартість та масу рухомої каретки другого плеча маніпулятора [23].

2.3.2 Вибір датчиків для ідентифікації характеристик об'єктів

Для забезпечення максимальної гнучкості сортувального пристрою та можливості класифікації деталей не лише за наявністю металу, а й за формою, кольором та геометричними розмірами, як основний інформаційно-вимірювальний елемент обрано промислову смарт-камеру машинного зору американської корпорації Cognex серії In-Sight 2000-130C, зображений на рисунку 2.4 [18].

Використання інтегрованої системи технічного зору замість масиву розрізнених дискретних датчиків дозволяє реалізувати багатofакторний аналіз об'єктів на конвеєрній стрічці за один робочий такт. Це рішення кардинально спрощує механічну конструкцію зони розпізнавання та дозволяє переналаштовувати пристрій на нові типи продукції виключно програмним шляхом без фізичного втручання в апаратну частину [18].

Технічне обґрунтування застосування смарт-камери Cognex In-Sight 2000-130C у проєктованій системі спирається на комплекс її унікальних апаратно-програмних характеристик. Насамперед, цей пристрій має вбудований високопродуктивний мікропроцесор, який виконує всі алгоритми розпізнавання образів безпосередньо «на борту». Це повністю розвантажує

центральный контролер сортувального маніпулятора, якому передаються лише готові координати центру мас об'єкта та код його класу через швидкісний промисловий інтерфейс Ethernet.

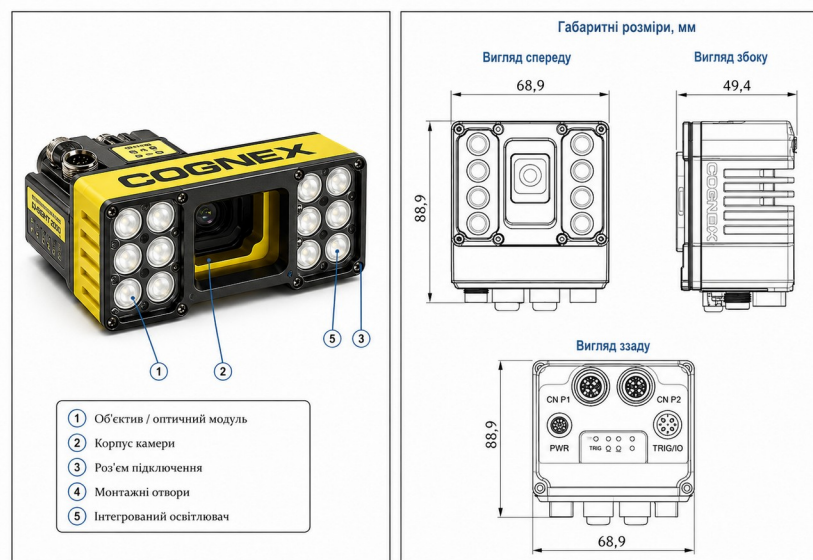


Рис. 2.4 — Зовнішній вигляд та габаритне креслення смарт-камери Cognex In-Sight 2000-130C

Надзвичайно важливою перевагою для умов реального виробництва є наявність інтегрованого кільцевого світлодіодного підсвічування та змінної оптики з автофокусуванням. Така архітектура усуває проблему мінливого зовнішнього освітлення в цеху, гарантуючи стабільно високий контраст зображення як для яскравих пластикових деталей, так і для металевих поверхонь із відблисками. Кольоровий CMOS-сенсор смарт-камери дозволяє з високою надійністю відбраковувати вироби за найменшими колірними відхиленнями, що неможливо реалізувати за допомогою класичних монохромних систем або звичайних фотоелектричних бар'єрів. Висока частота захоплення кадрів забезпечує своєчасну ідентифікацію об'єктів навіть при максимальній швидкості руху конвеєрної стрічки без виникнення ефекту розмиття контурів [18].

Для інтеграції оптичної системи в математичну модель маніпулятора та розрахунку інтерфейсів обміну даними, усі ключові технічні характеристики обраної смарт-камери систематизовано та зведено в таблицю 2.2.

Аналіз даних таблиці 2.2 підтверджує, що обрана смарт-камера за своїми швидкодією, роздільною здатністю та стійкістю до промислових умов повністю відповідає динамічним можливостям сервоприводів маніпулятора. Використання стандартизованої напруги живлення 24 В дозволяє жити систему технічного зору від того ж силового контуру, що й логічну частину драйверів двигунів, мінімізуючи кількість блоків живлення у загальній структурній схемі [18].

Таблиця 2.2 — Основні технічні та експлуатаційні параметри смарт-камери Cognex In-Sight 2000-130C

Найменування технічного параметра	Одиниці виміру та значення величини
Тип чутливого елемента (сенсора)	1/3" CMOS, кольоровий
Роздільна здатність матриці	800 × 600 пікселів
Максимальна частота захоплення кадрів	40 кадрів/с (fps)
Вбудоване освітлення	Інтегроване кільцеве LED-підсвічування
Оптика	S-Mount / M12 (із можливістю автофокусування)
Комунікаційні інтерфейси	10/100 Base-T Ethernet, RS-232C
Цифрові входи / виходи	1 оптоізольований вхід / 1 оптоізольований вихід
Напруга живлення	24 В постійного струму (DC)

Найменування технічного параметра	Одиниці виміру та значення величини
Споживана потужність	Не більше 3,2 Вт
Клас захисту корпусу від зовнішніх чинників	IP65 / IP67
Допустимий температурний діапазон середовища	від 0 °C до +40 °C

2.3.3 Проєктування системи подачі об'єктів

Для забезпечення безперервного та ритмічного надходження штучних об'єктів у робочу зону маніпулятора SCARA, що є критичною умовою для досягнення розрахункової продуктивності всього сортувального комплексу, як основний механізм подачі обрано прямолінійний стрічковий конвеєр. На відміну від гравітаційних скатних лотків або вібробункерів, механізований стрічковий конвеєр дозволяє здійснювати жорсткий просторовий та часовий контроль переміщення деталей, унеможливаючи їхнє хаотичне скупчення, перекриття або пошкодження під час взаємних зіткнень [19].

Як силовий агрегат для привода конвеєрної стрічки обрано малогабаритний циліндро-конічний мотор-редуктор змінного струму виробництва компанії SEW-EURODRIVE серії WA20, зображений на рисунку 2.5. Такий вибір обґрунтовується високим коефіцієнтом корисної дії конічної передачі та надзвичайно компактними габаритами, що дозволяє ергономічно інтегрувати привід безпосередньо в раму конвеєра без виступаючих частин. Для забезпечення можливості безступеневого регулювання швидкості стрічки та реалізації алгоритмів плавного пуску і гальмування, керування трифазним асинхронним двигуном здійснюється

через компактний векторний перетворювач частоти Delta Electronics серії MS300 [17]. Використання частотного регулювання гарантує точну синхронізацію лінійної швидкості подачі заготовок із тривалістю робочого циклу маніпулятора та суттєво знижує пускові струми і механічні навантаження на стрічку.

Для просторової локалізації об'єкта та генерації тригерного (запускаючого) сигналу на вході в робочу зону маніпулятора встановлюється високошвидкісний промисловий фотоелектричний датчик дифузійного типу SICK серії W16. Він безконтактно фіксує перетин оптичного променя фронтальною кромкою деталі та миттєво надсилає апаратне переривання на центральний мікроконтролер. Отримавши цей сигнал, система керування ініціює зупинку конвеєра у визначеній координаті та запускає алгоритм візуального розпізнавання за допомогою смарт-камери, про яку йшлося в попередньому підрозділі [20].

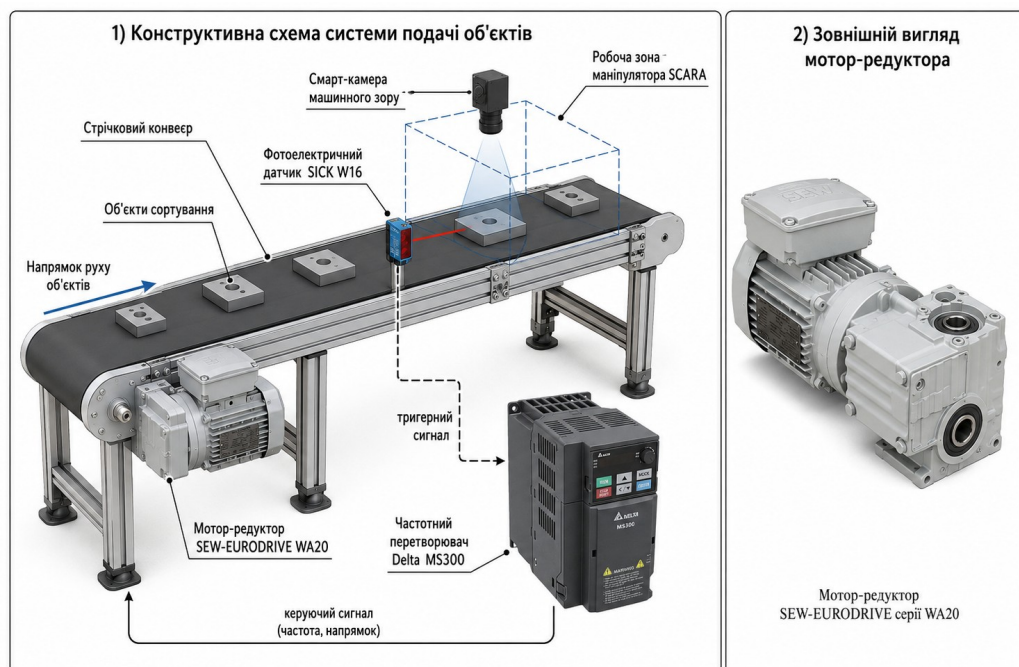


Рис. 2.5 — Конструктивна схема системи подачі об'єктів та зовнішній вигляд мотор-редуктора

Основні технічні параметри обраного електромеханічного привода та сенсорного забезпечення системи подачі, необхідні для розрахунку загального енергоспоживання та конфігурування логіки керування, зведено в таблиці 2.3 [17, 19, 20].

Таблиця 2.3 — Технічні характеристики компонентів системи подачі об'єктів

Найменування технічного параметра	Одиниці виміру та значення величини
Тип привідного механізму	Циліндро-конічний мотор-редуктор (SEW-EURODRIVE WA20)
Номінальна потужність електродвигуна	0,18 кВт
Номінальна напруга живлення двигуна	3x230/400 В, 50 Гц
Пристрій керування приводом	Векторний перетворювач частоти (Delta MS300)
Метод керування швидкістю	Широтно-імпульсна модуляція (V/f та векторне)
Тип тригерного датчика	Фотоелектричний дифузійний з придушенням фону (SICK W16)
Час відгуку датчика виявлення	Менше 0,5 мс
Дальність стабільного виявлення об'єкта	від 10 до 1000 мм (налаштовується)
Клас захисту обладнання	IP65

Представлена апаратна конфігурація системи подачі формує надійний асинхронний вузол, який легко інтегрується в єдину інформаційну мережу сортувального пристрою та забезпечує детерміноване позиціонування деталей перед їхнім захопленням ендефектором маніпулятора.

2.3.4 Вибір центрального керуючого пристрою

Організація чіткої та детермінованої взаємодії між усіма підсистемами роботизованого сортувального комплексу вимагає застосування високопродуктивного обчислювального ядра. Цей пристрій повинен у реальному часі опрацьовувати високочастотні сигнали від тригерних датчиків та енкодерів, координувати роботу драйверів сервомоторів через спеціалізовані інтерфейси, а також приймати і дешифрувати пакети даних від смарт-камери технічного зору по мережевих протоколах. Для вирішення цього комплексу завдань як центральний керуючий пристрій було обрано 32-бітний мікроконтролер корпорації STMicroelectronics серії STM32F407VGT6 на базі архітектури ARM Cortex-M4 із вбудованим апаратним математичним прискорювачем (FPU), який наведено на рисунку 2.6 [14].

Вибір цієї мікропроцесорної платформи є технологічно обґрунтованим компромісом між гнучкістю програмування, швидкістю обчислень та вартістю елементної бази. На відміну від стандартних 8-бітних мікроконтролерів, обчислювальна потужність обраного чипа дозволяє без затримок розв'язувати системи тригонометричних рівнянь прямої та зворотної задач кінематики маніпулятора SCARA безпосередньо під час руху, що гарантує високу плавність формування траєкторії переміщення робочого органу.

Технічна доцільність інтеграції мікроконтролера STM32F407VGT6 у розроблювану систему керування підтверджується його розвиненою апаратною периферією. Важливою архітектурною перевагою є наявність

інтегрованого макромодуля Ethernet MAC з підтримкою інтерфейсів MII/RMII, що дозволяє організувати прямий високошвидкісний обмін даними зі смарт-камерою Cognex за протоколами Modbus TCP або EtherNet/IP без використання додаткових шлюзів чи конвертерів. Крім того, мікроконтролер оснащений великою кількістю спеціалізованих таймерів із підтримкою режимів генерації ШІМ (PWM) та прямого підключення квадратурних енкодерів, що дає змогу апаратно формувати точні послідовності керуючих імпульсів для сервоводравелів Delta MS300 та драйверів вертикальної осі [14].

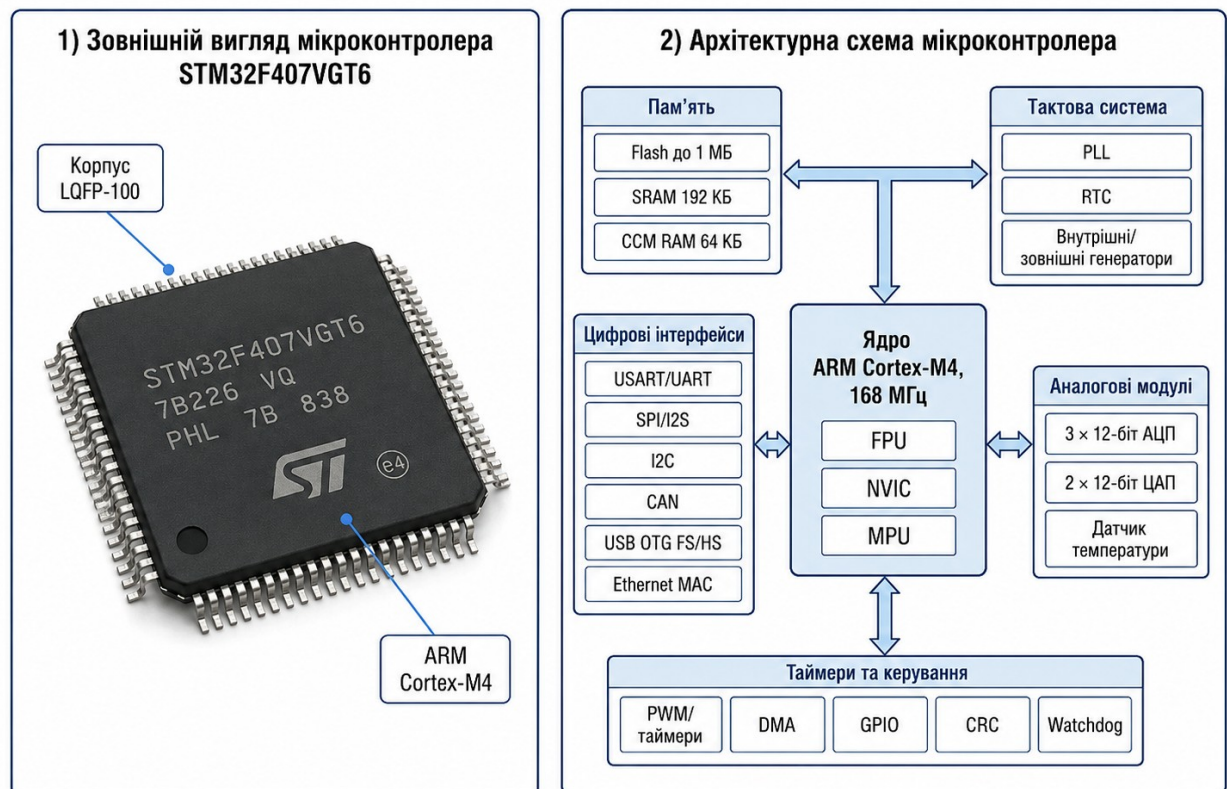


Рис. 2.6 — Зовнішній вигляд та архітектурна схема мікроконтролера STM32F407VGT6

Наявність багатоканального контролера прямого доступу до пам'яті (DMA) забезпечує розвантаження центрального процесорного ядра під час

інтенсивного приймання інформації з вимірювальних портів, оскільки перенесення даних від периферійних інтерфейсів в оперативну пам'ять відбувається на апаратному рівні без залучення ресурсів ALU. Завдяки високій тактовій частоті 168 МГц та розширеному об'єму флеш-пам'яті, пристрій дозволяє глибоко оптимізувати програмний код логіки сортування та реалізувати складні алгоритми фільтрації завад у ланцюгах сенсорів.

Для розробки електричної схеми вузла керування, розрахунку параметрів завадостійких фільтрів та конфігурування шин живлення, основні паспортні характеристики обраного мікроконтролера систематизовано у таблиці 2.4 [14].

Таблиця 2.4 — Ключові технічні параметри мікроконтролера STM32F407VGT6

Найменування технічного параметра	Значення та одиниці виміру параметричної величини
Архітектура та тип процесорного ядра	32-бітний ARM Cortex-M4 з обчислювальним блоком FPU
Максимальна тактова частота ядра	168 МГц
Об'єм вбудованої Flash-пам'яті програм	1024 Кбайт
Об'єм оперативної пам'яті (SRAM)	192 Кбайт
Кількість ліній вводу/виводу загального призначення (GPIO)	82 порти з підтримкою переривань
Апаратні таймери / лічильники	17 модулів (включно з двома 32-бітними таймерами)
Мережеві та комунікаційні інтерфейси	Ethernet (MII/RMII), 3xI2C, 3xSPI, 4xUSART, 2xUART, 2xCAN
Номінальна напруга живлення логічного ядра	від 1,8 В до 3,6 В (типове значення 3,3 В)

Найменування технічного параметра	Значення та одиниці виміру параметричної величини
Тип корпусу мікросхеми	LQFP100 (чотиристоронній плоский з 100 виводами)
Допустима температура експлуатації кристаллу	від -40 °C до +85 °C

Аналіз наведених у таблиці 2.4 електричних та функціональних властивостей підтверджує, що мікроконтролер STM32F407VGT6 повністю задовольняє критеріям побудови надійної промислової системи керування. Робота логічних виводів від напруги 3,3 В вимагатиме правильного узгодження рівнів при комутації із 24-вольтними ланцюгами промислових драйверів та датчиків, що буде детально розв'язано на етапі проектування електричної схеми підключення.

2.4 Розробка електричної схеми підключення компонентів системи керування

Розробка принципової електричної схеми є критично важливим етапом інтеграції розрізнених апаратних компонентів у єдиний функціональний комплекс. Головним завданням цього етапу є забезпечення стабільного електроживлення всіх вузлів, організація надійного обміну даними між сенсорами та контролером, а також реалізація апаратного захисту слабкострумових логічних кіл від електромагнітних завад і перенапруг, що генеруються потужними виконавчими механізмами.

З огляду на використання мікроконтролера STM32F407VGT6, логічні порти якого функціонують із напругою 3,3 В, та промислової периферії, що

використовує стандартні рівні 24 В, архітектура електричної схеми будується за принципом повної гальванічної розв'язки (рис.2.7).

Організація підсистеми електроживлення комплексу передбачає розділення енергетичних потоків на силовий та керуючий контури. Силовий контур підключається безпосередньо до промислової мережі змінного струму (230/400 В) через ввідний автоматичний вимикач та мережевий ЕМП-фільтр, який запобігає поширенню високочастотних перешкод.

Від цієї лінії отримують живлення частотний перетворювач Delta MS300 привода конвеєра та серводрайвери Delta ASDA-B2 осей маніпулятора [15, 17]. Керуючий контур живиться від промислового імпульсного блоку живлення (наприклад, формату DIN-рейки), який перетворює мережеву напругу в стабілізовані 24 В постійного струму [24]. Ця лінія забезпечує енергією смарт-камеру Cognex, оптичний датчик SICK W16, електромагнітні реле та керівні кола моторних драйверів. Для живлення безпосередньо плати мікроконтролера STM32 використовується вторинний понижувальний DC-DC перетворювач із вихідною напругою 5 В, яка вже на самій платі стабілізується до робочих 3,3 В за допомогою лінійного регулятора (LDO) [14, 24].

Підключення інформаційно-вимірювальних пристроїв вимагає суворого узгодження логічних рівнів. Дифузійний фотоелектричний датчик SICK W16, маючи транзисторний PNP-вихід, формує сигнал рівня 24 В при виявленні об'єкта [20]. Для безпечного передавання цього імпульсу на вхід мікроконтролера застосовується проміжна плата з високошвидкісними оптопарами. Світлодіод оптопари комутується струмом від датчика через струмообмежувальний резистор, а фототранзистор замикає відповідний висновок STM32 на «землю», формуючи низький логічний рівень, який обробляється контролером як апаратне переривання (EXTI). Смарт-камера Cognex не потребує додаткового узгодження напруг для передачі даних, оскільки її взаємодія з мікроконтролером здійснюється ізольованими

трансформаторами через стандартизований мережевий інтерфейс Ethernet [18].

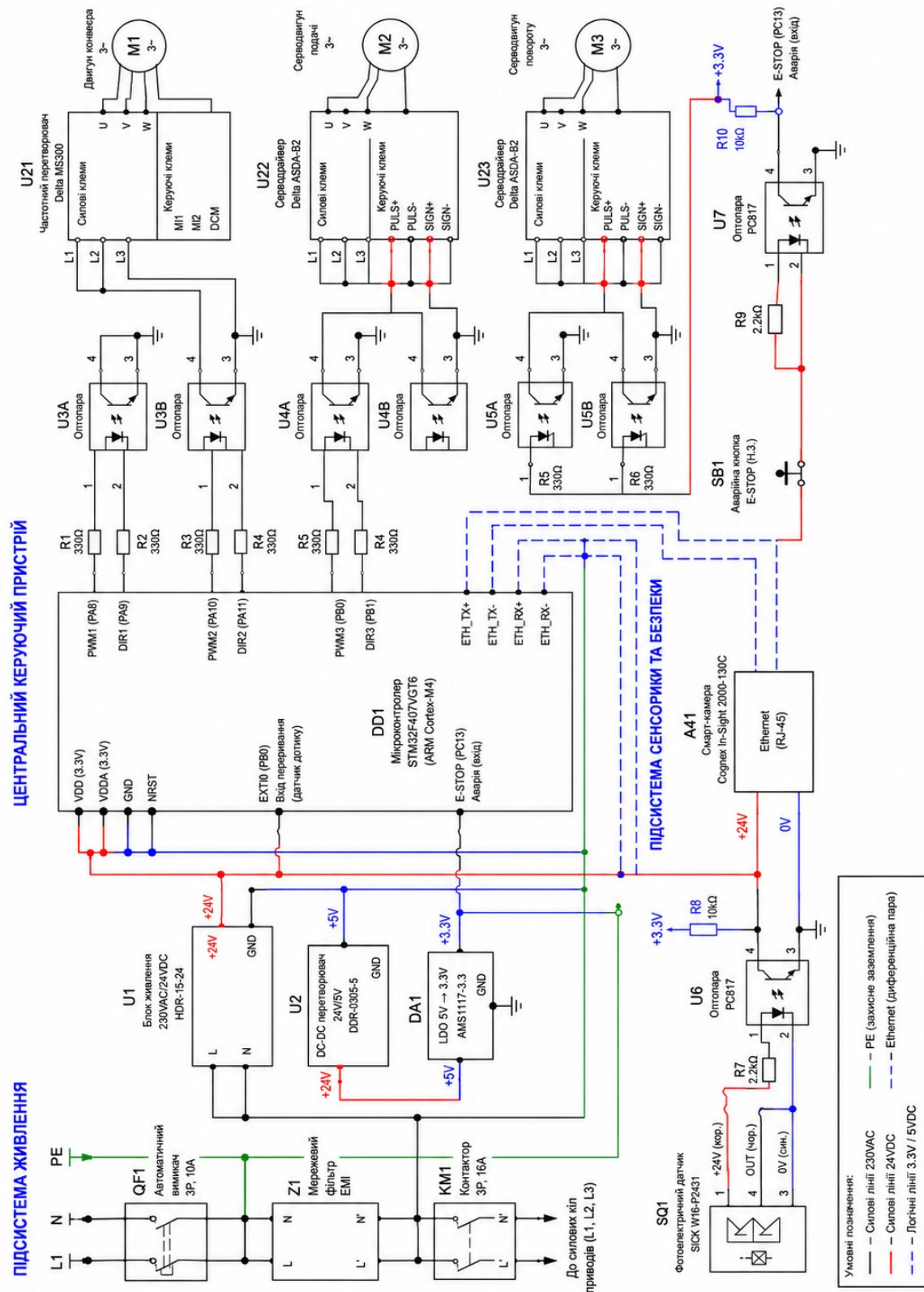


Рис. 2.7 — Принципова електрична схема підключення керуючого та силового обладнання

Керування виконавчими механізмами здійснюється за допомогою інтерфейсів генерації імпульсів (Pulse/Dir). Оскільки входи серводрайверів ASDA-B2 також розраховані на промислові рівні напруги та оснащені власними оптронами, мікроконтролер STM32 керує ними через спеціалізований буферний каскад на базі транзисторних ключів. Таймери мікроконтролера генерують високочастотні ШІМ-сигнали позиціювання, які посилюються транзисторами до рівня 24 В і передаються на клеми драйвера. Це дозволяє уникнути перевантаження вихідних портів процесора [15, 16].

Окремим і надзвичайно важливим елементом електричної схеми є ланцюг аварійної зупинки (E-Stop). Згідно з вимогами промислової безпеки, кнопка аварійної зупинки грибкового типу підключається не до логічного входу мікроконтролера, а в розрив ланцюга живлення котушки головного захисного контактора. При натисканні на кнопку відбувається миттєве апаратне знеструмлення силових ліній усіх двигунів маніпулятора та конвеєра, що гарантує зупинку рухомих частин навіть у випадку повного програмного зависання керуючого мікропроцесора. Додатковий нормально розімкнутий контакт цієї ж кнопки надсилає інформаційний сигнал на STM32 для фіксації факту аварії в системному журналі.

Висновки за розділом

У другому розділі виконано комплексне проєктування апаратної та кінематичної структури автоматизованого сортувального комплексу, що заклало основу для реалізації високоефективної системи управління. Системний підхід до побудови структурної схеми дозволив забезпечити чітку координацію між підсистемою сенсорики, центральним обчислювальним ядром та виконавчими механізмами, при цьому впровадження фізичного розділення силових і логічних контурів живлення стало критичним рішенням

для мінімізації впливу електромагнітних завад на стабільність роботи мікропроцесорної техніки.

Теоретичні розрахунки, здійснені за структурною формулою Сомова-Малишева, підтвердили наявність чотирьох ступенів вільного ходу маніпулятора архітектури SCARA, що є оптимальним для виконання складних операцій із просторового позиціювання та орієнтації об'єктів. Побудова аналітичної геометричної моделі робочого простору дозволила чітко локалізувати межі досяжності та «мертві» зони, що мінімізує ризики виникнення колізій та забезпечує безконфліктну інтеграцію маніпулятора з лінією транспортування заготовок.

Обґрунтовано вибір високопродуктивної елементної бази, орієнтованої на промислові стандарти швидкодії та точності: використання синхронних сервомоторів Delta Electronics із 17-бітними енкодерами гарантує прецизійну повторюваність позиціювання, а інтеграція смарт-камери Cognex In-Sight забезпечує надійну апаратну обробку візуальних даних, що суттєво розвантажує центральний 32-бітний контролер STM32F407VGT6. Розроблена принципова електрична схема успішно вирішує завдання узгодження логічних рівнів периферії з промисловими інтерфейсами через швидкісні оптопари, що забезпечує необхідну гальванічну ізоляцію. Окрема увага до питань безпеки, а саме впровадження апаратного контуру аварійної зупинки, що діє незалежно від стану програмного забезпечення мікроконтролера, гарантує миттєве знеструмлення приводів при виникненні нештатних ситуацій, що відповідає сучасним вимогам до промислового обладнання.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1. Розробка загального алгоритму роботи сортувального пристрою

Функціонування автоматизованого сортувального комплексу базується на чіткій послідовності взаємопов'язаних логічних операцій, які забезпечують безперебійний циклічний процес обробки штучних об'єктів. Для формалізації логіки керування та створення надійної програмної архітектури розроблено загальний алгоритм роботи системи. Цей алгоритм координує дії інформаційно-вимірювальних пристроїв, центрального обчислювального вузла та виконавчих приводів, перетворюючи їх у детермінований автоматичний цикл із мінімальним часом відгуку на зміну зовнішніх умов виробничого процесу (рис. 3.1).

Початок роботи сортувального комплексу пов'язаний із процедурою ініціалізації системи керування, яка запускається одразу після подачі електроживлення на плату мікроконтролера. На цьому етапі відбувається конфігурування внутрішньої периферії процесора, налаштування портів введення-виведення загального призначення, ініціалізація апаратних таймерів для генерації керуючих ШІМ-імпульсів, а також встановлення мережевого з'єднання зі смарт-камерою технічного зору по інтерфейсу Ethernet. Після успішного завершення самодіагностики та перевірки відсутності сигналів аварійного блокування мікроконтролер переводить серводрайвери маніпулятора SCARA у режим позиціонування і запускає процедуру виходу виконавчих ланок у базову (нульову) координату. Після досягнення початкового просторового стану система переходить у фазу очікування та

видає команду частотному перетворювачу на запуск привода стрічкового конвеєра для подачі деталей у робочу зону.



Рис. 3.1 — Блок-схема загального алгоритму роботи роботизованого сортувального комплексу

Транспортування деталей конвеєрною стрічкою продовжується до моменту спрацювання фотоелектричного датчика виявлення, встановленого на вході до зони досяжності робота. Перетин оптичного променя фронтальною кромкою об'єкта генерує апаратне переривання на відповідному виводі мікроконтролера. За цим тригером обчислювальне ядро миттєво призупиняє виконання фонових завдань і надсилає команду частотному перетворювачу на екстрене векторне гальмування асинхронного двигуна, що призводить до повної зупинки конвеєра. Деталь фіксується у строго визначеній просторовій позиції, після чого центральний керуючий пристрій ініціює такт роботи системи технічного зору шляхом надсилання мережевого запиту на захоплення кадру промисловою смарт-камерою.

Фаза розпізнавання та класифікації виконується внутрішнім процесором смарт-камери, який аналізує геометричні, колірні або контурні ознаки заготовки. Після завершення математичної обробки зображення смарт-камера формує вихідний інформаційний пакет, що містить координати центру мас об'єкта відносно власної матриці та числовий ідентифікатор приналежності до конкретного класу сортування. Цей пакет передається по мережі Ethernet у буфер оперативної пам'яті мікроконтролера. Обчислювальне ядро STM32 дешифрує пакет, виконує трансформацію координат із системи смарт-камери у декартову систему координат маніпулятора, і на основі отриманих лінійних величин здійснює аналітичний розв'язок зворотної задачі кінематики для визначення цільових кутів повороту ланок робота.

Наступний етап алгоритму координує безпосередній рух маніпулятора за розрахованою траєкторією. Мікроконтролер активує високочастотні канали генерації ШІМ-імпульсів, які через буферні оптопари надходять на входи серводрайверів першої та другої осей, і одночасно запускає привід вертикального переміщення. Координація швидкостей налаштована таким чином, щоб кінцевий ендефектор підходив до деталі за найкоротшою

просторовою кривою без виникнення механічних ударів. У кінцевій точці спуску видається дискретний сигнал на замикання виконавчого схвата, і після короткої витримки часу, необхідної для надійної фіксації об'єкта, запускається алгоритм реверсивного підйому та переміщення деталі в зону накопичувальних лотків.

Напрямок та кінцева координата транспортного руху маніпулятора жорстко визначаються ідентифікатором класу, який було отримано від смарт-камери на етапі класифікації. Робот переносить заготовку до відповідного лотка, здійснює розмикання схвата, скидаючи деталь, і за оптимізованою траєкторією повертається у вихідну нульову позицію. Одночасно з початком зворотного руху маніпулятора мікроконтролер видає команду на повторний пуск мотор-редуктора конвеєра, відновлюючи рух стрічки для подачі наступного штучного виробу. На цьому логічний такт алгоритму завершується, і система автоматично переходить у стан очікування нового сигналу від фотоелектричного датчика, забезпечуючи безперервний циклічний режим роботи сортувальної лінії.

Деталізація загального керуючого алгоритму вимагає розкриття внутрішньої логіки його найбільш ресурсоємних етапів, першим з яких є підпрограма розрахунку зворотної задачі кінематики. Цей алгоритмічний блок активується одразу після отримання та дешифрування цільових декартових координат від системи технічного зору. Внутрішня структура підпрограми, наведена на рисунку 3.2, розпочинається з етапу просторової валідації: мікроконтролер обчислює модуль радіус-вектора заданої точки та перевіряє його входження у дозволена робочу зону маніпулятора, відтинаючи координати «мертвої зони» та недосяжного простору. У разі успішної перевірки алгоритм ініціює математичний апарат розв'язання системи тригонометричних рівнянь. З використанням теореми косинусів та функцій арктангенса обчислюються цільові кути повороту першого та другого плеча механізму у радіанах. На фінальній стадії підпрограми отримані кутові

значення масштабуються з урахуванням передаточних чисел механічних редукторів та роздільної здатності абсолютних енкодерів, трансформуючись у цілочисельну кількість керуючих кроків (імпульсів) для кожного окремого серводрайвера.

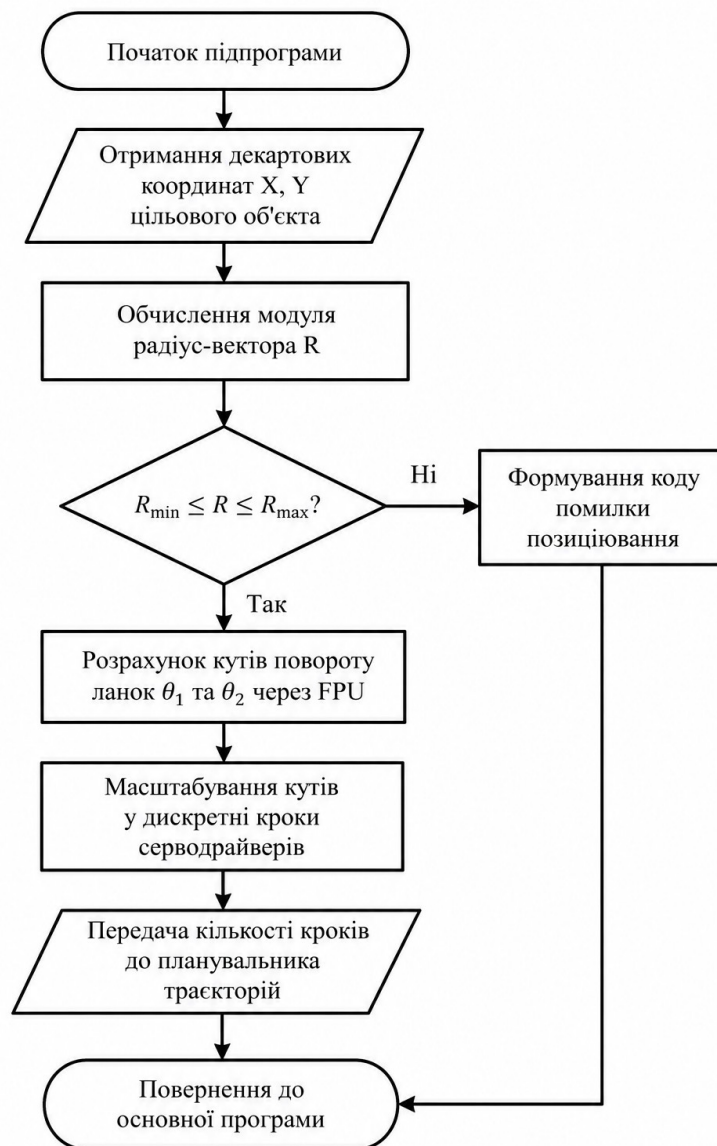


Рис. 3.2 — Блок-схема алгоритму розрахунку зворотної задачі кінематики

Другим фундаментальним етапом основного циклу є підпрограма безпосереднього руху маніпулятора за розрахованими координатами, яка відповідає за перетворення математичних величин у фізичне переміщення ланок. Пряма і миттєва подача згенерованої кількості імпульсів на

серводрайвери є технологічно неприпустимою, оскільки це призведе до жорстких інерційних ударів у конструкції та значної похибки позиціювання. Тому внутрішня логіка цього блоку, відображена на рисунку 3.3, базується на роботі траєкторного планувальника, який формує оптимізований трапецеїдальний профіль швидкості.

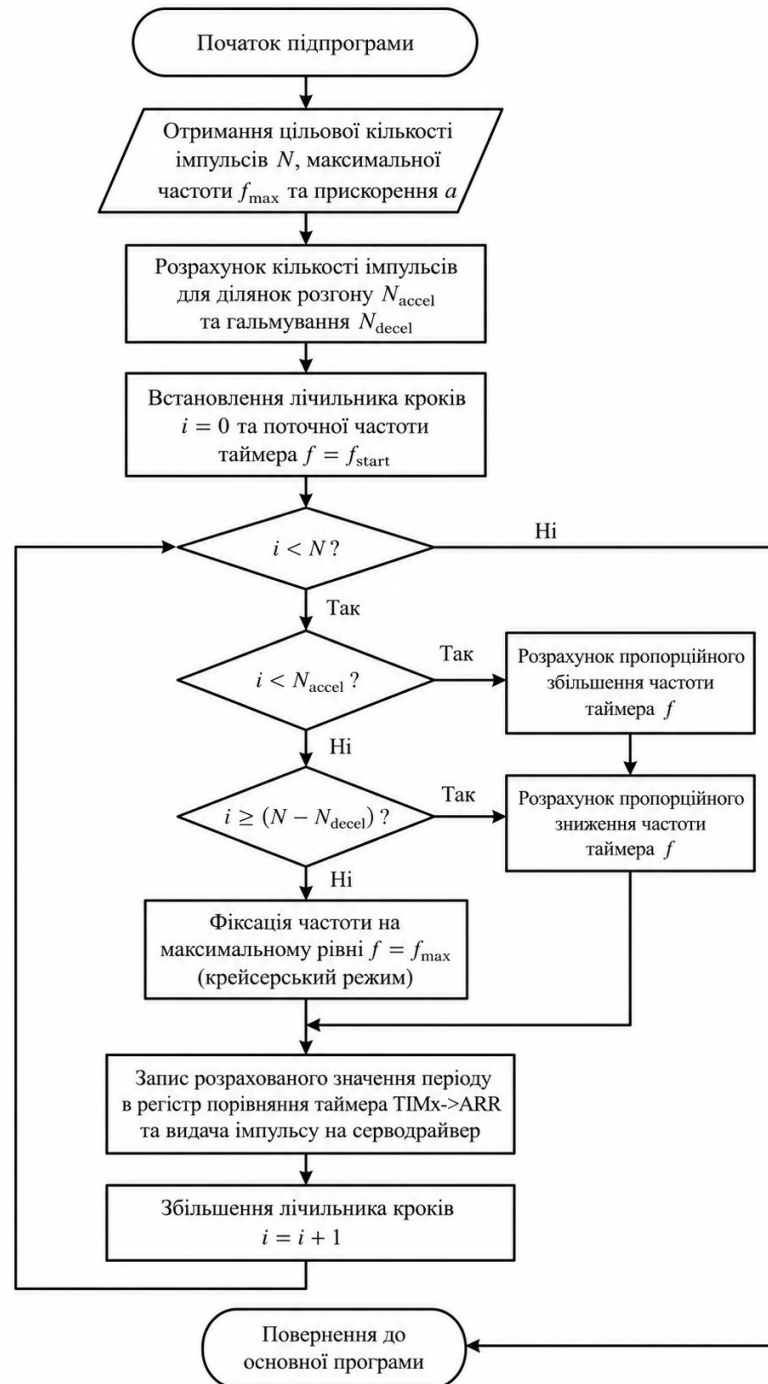


Рис. 3.3 — Блок-схема алгоритму керування рухом маніпулятора за профілем швидкості

Алгоритм динамічно модифікує значення регістрів переповнення апаратних таймерів мікроконтролера: на початку виконання руху частота генерації ШІМ-імпульсів плавно наростає, забезпечуючи м'яке прискорення виконавчих механізмів, далі підтримується на постійному рівні номінальної швидкості, а при наближенні залишку кроків до нуля — пропорційно спадає. Такий підхід гарантує плавне гальмування та прецизійну зупинку ендефектора точно над цільовим об'єктом без виникнення паразитних вібрацій.

3.2. Програмування та налаштування системи технічного зору

Інтеграція системи технічного зору до загального контуру керування роботизованого комплексу вимагає детального програмного налаштування та конфігурування промислової смарт-камери Cognex In-Sight 2000-130C. Основним інструментальним середовищем для розробки алгоритмів розпізнавання є спеціалізоване програмне забезпечення In-Sight Explorer, робота у якому базується на використанні покрокового інтерфейсу EasyBuilder (рис. 3.4). Цей інтерфейс дозволяє послідовно виконати всі етапи створення проєкту машинного зору, починаючи від апаратного налаштування параметрів захоплення зображення і закінчуючи форматизацією вихідних комунікаційних пакетів для передачі даних на центральний мікроконтролер.

Першочерговим етапом програмування є конфігурування параметрів оптичної системи та захоплення кадрів у підрозділі налаштування зображення. Для усунення ефекту розмиття контурів предметів, що рухаються на конвеєрній стрічці, встановлюється мінімально можливий час експозиції (витримки електронного затвора матриці), який узгоджується з інтенсивністю інтегрованого кільцевого світлодіодного підсвічування. Наступним критично важливим кроком є калібрування системи координат, що дозволяє перевести матричні координати пікселів у реальні фізичні

величини. Шляхом фіксації еталонного об'єкта або використання сітки калібрування вбудований математичний апарат смарт-камери розраховує коефіцієнти трансформації, завдяки чому просторові зміщення центру мас деталей обчислюються безпосередньо у міліметрах відносно обраної точки відліку, яка суміщається з віссю транспортера.

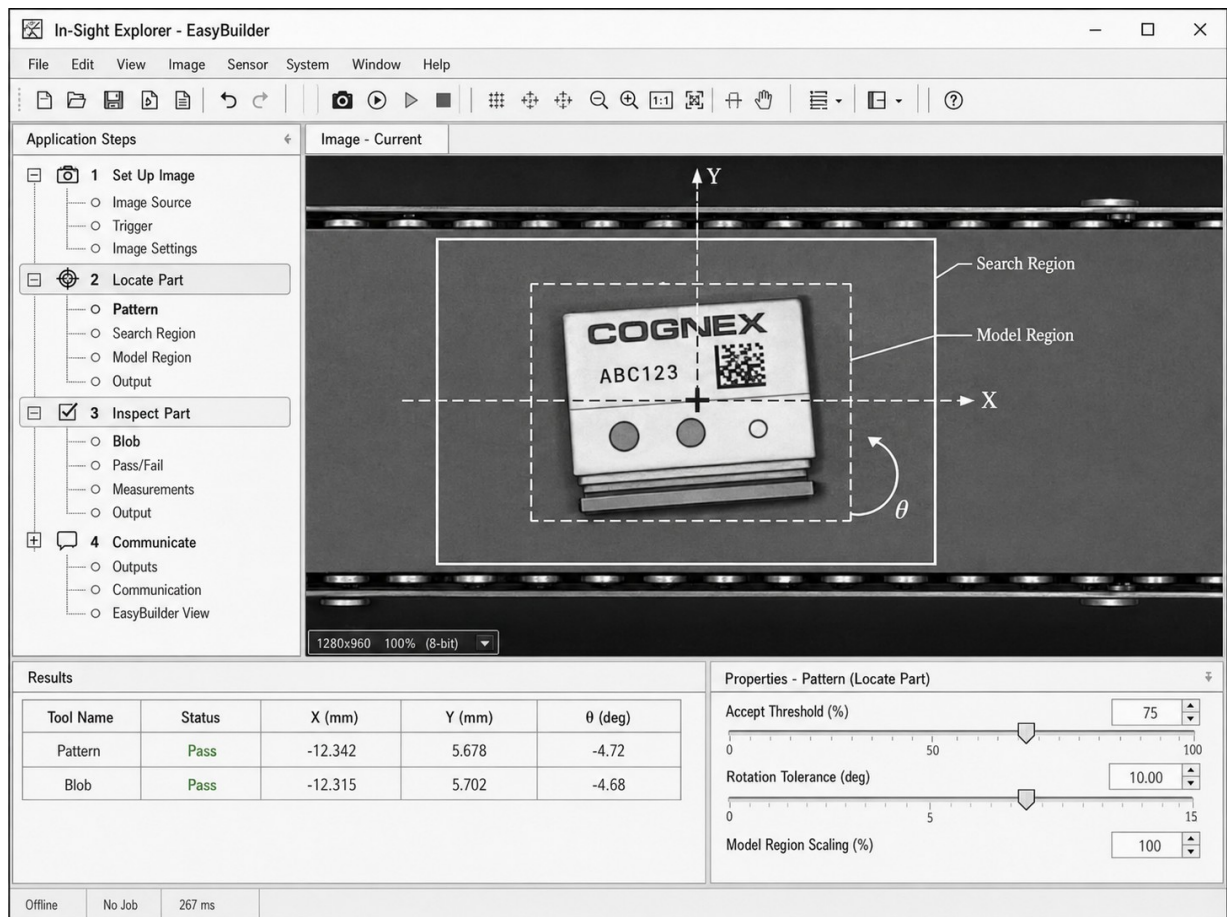


Рис. 3.4 — Інтерфейс налаштування інструментів розпізнавання та локалізації об'єктів у середовищі In-Sight Explorer

Для стабільної фіксації об'єктів незалежно від їхнього хаотичного розташування на стрічці застосовуються інструменти локалізації деталей. Основним алгоритмічним ядром тут виступає інструмент пошуку за шаблоном (Pattern Location Tool), який базується на методах нормалізованої взаємно-кореляційної обробки або контурного аналізу геометричних граней.

Програма запам'ятовує еталонний образ деталі, після чого на кожному новому кадрі здійснює високошвидкісний пошук відповідної матриці яскравості, визначаючи не лише лінійне зміщення за осями X та Y , а й кут розвороту об'єкта відносно поздовжньої осі конвеєра. Знайдена позиція шаблону стає динамічною системою координат для всіх наступних інструментів інспектування, що нівелює вплив геометричних зсувів на точність аналізу.

Безпосередня класифікація штучних виробів реалізується за допомогою групи інструментів вимірювання та розпізнавання ознак. Для диференціації деталей за кольірними характеристиками розгортається інструмент підрахунку кольірних пікселів (Color Pixel Count) або аналізу кольірних областей (Color Blob Tool), який здійснює сегментацію зображення у просторі HSV або RGB та порівнює отримані кольірні вектори із заздалегідь навченими профілями еталонів. Одночасно з цим геометричні інструменти аналізу бінарних великих об'єктів (Blob Tools) обчислюють площу плями, периметр, ексцентриситет та габаритні розміри обмежувальної рамки виробу. Комбінація цих параметрів дозволяє внутрішньому логічному скрипту смарт-камери однозначно присвоїти об'єкту цілочисельний ідентифікатор класу сортування, відсікаючи при цьому можливий виробничий брак або сторонні предмети.

Фінальна стадія налаштування смарт-камери присвячена конфігуруванню комунікаційного інтерфейсу та формуванню структури вихідних даних. У розділі налаштування зв'язку активується підтримка промислового мережевого протоколу, інтегрованого у логіку роботи комплексу, наприклад Modbus TCP або EtherNet/IP. Програмне забезпечення камери відображає розраховані координати центру мас об'єкта та код його класу на конкретні вихідні регістри даних або байти системної пам'яті. Сформований пакет містить послідовні поля для лінійного зсуву за віссю X , зсуву за віссю Y , кута орієнтації та номера класу. Цей масив інформації

автоматично оновлюється після кожного успішного такту роботи інструментів інспектування і перебуває у постійній готовності для зчитування апаратним Ethernet-модулем мікроконтролера STM32, що замикає інформаційний контур системи технічного зору.

3.3 Програмна реалізація керування маніпулятором на базі мікроконтролера

Програмна реалізація алгоритмів керування сортувальним комплексом виконана мовою C/C++ у середовищі розробки STM32CubeIDE. Для забезпечення високої надійності та абстрагування від низькорівневих регістрів використано офіційну бібліотеку драйверів HAL (Hardware Abstraction Layer). Архітектура вбудованого програмного забезпечення базується на подійно-орієнтованому підході, де критичні за часом події обробляються через механізм векторних переривань (NVIC), а математичні обчислення виконуються в основному циклі програми.

Першим критичним модулем системи є обробник апаратного переривання від оптичного датчика наявності деталі. При фіксації фронтальної кромки об'єкта мікроконтролер миттєво генерує переривання на лінії EXTI. У функції зворотного виклику здійснюється екстрена зупинка привода конвеєра шляхом скидання відповідного логічного піна, після чого встановлюється глобальний прапорець (семафор) для ініціалізації роботи системи технічного зору. Фрагмент коду, що реалізує цю логіку, наведено в лістингу 3.1.

/ Лістинг 3.1 — Функція обробки апаратного переривання EXTI */*

```
volatile uint8_t part_ready_flag = 0; // Глобальний прапорець готовності  
void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin) {
```

```

    /* Перевірка джерела переривання (пін датчика SICK) */

if(GPIO_Pin == SENSOR_EXTI_PIN) {

    /* Екстрена зупинка частотного перетворювача конвеєра */

    HAL_GPIO_WritePin(CONVEYOR_PORT,          CONVEYOR_STOP_PIN,
GPIO_PIN_RESET);

    /* Встановлення семафора для основного циклу */

    part_ready_flag = 1;

    /* Очищення прапорця переривання виконується автоматично макросом
    HAL */}

```

Другим фундаментальним модулем є підпрограма розв'язання зворотної задачі кінематики маніпулятора SCARA, алгоритм якої представлено на рисунку 3.2. Після дешифрування мережевого пакета від смарт-камери Cognex, мікроконтролер отримує декартові координати об'єкта. Програмний модуль здійснює просторову валідацію цілі, розраховує довжину радіус-вектора i , використовуючи апаратний блок FPU (Floating Point Unit), обчислює цільові кути повороту ланок за допомогою математичних функцій одинарної точності. Реалізація цього математичного апарату представлена в лістингу 3.2.

```

    /* Лістинг 3.2 — Підпрограма розрахунку зворотної задачі кінематики
    */

#include <math.h>

#define L1_LEN 300.0f // Довжина першого плеча, мм

#define L2_LEN 250.0f // Довжина другого плеча, мм

#define R_MIN 100.0f // Радіус мертвої зони, мм

#define R_MAX 540.0f // Радіус максимальної досяжності, мм

```

```

    /* Функція повертає 0 у разі успіху, або -1 при виході за межі робочої
зони

int8_t Calculate_Kinematics(float x, float y, float *theta1, float *theta2) {

float R_sq = (x * x) + (y * y);

float R = sqrtf(R_sq);

    /* Просторова валідація координат */

if(R < R_MIN || R > R_MAX) {

return -1; // Помилка позиціювання

    /* Розрахунок кута другого плеча (Теорема косинусів) */

float cos_theta2 = (R_sq - (L1_LEN * L1_LEN) - (L2_LEN * L2_LEN)) / (2.0f *
L1_LEN * L2_LEN);

*theta2 = acosf(cos_theta2); // Радіани

    /* Розрахунок кута першого плеча */

float alpha = atan2f(y, x);

float beta = acosf((R_sq + (L1_LEN * L1_LEN) - (L2_LEN * L2_LEN)) / (2.0f *
L1_LEN * R));

*theta1 = alpha - beta; // Радіани

return 0; // Успішний розрахунок}

```

Третім програмним блоком є траєкторний планувальник, який відповідає за плавний рух механічних ланок без інерційних ударів. Згідно з алгоритмом трапецеїдального профілю швидкості (рис. 3.3), генерація керуючих імпульсів (Pulse) для серводрайверів виконується в перериванні апаратного таймера. Програма динамічно розраховує поточну частоту та перезаписує регістр порівняння таймера (ARR), забезпечуючи плавний

розгін, стабільний рух та плавне гальмування привода. Відповідний програмний код наведено у лістингу 3.3.

/ Лістинг 3.3 — Генератор трапецеїдального профілю швидкості (Переривання таймера) */*

```
volatile uint32_t step_count = 0;    // Поточний лічильник кроків
volatile uint32_t total_steps = 0;   // Загальна кількість кроків до цілі
volatile uint32_t accel_steps = 0;   // Кількість кроків для розгону
volatile float current_freq = 100.0f; // Початкова частота, Гц

void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim) {
    if(htim->Instance == TIM2) {
        if(step_count < total_steps) {

            /* Фаза розгону */

            if(step_count < accel_steps) {
                current_freq += ACCEL_RATE;}

            /* Фаза гальмування */

            else if(step_count >= (total_steps - accel_steps)) {
                current_freq -= ACCEL_RATE;}

            /* Обмеження максимальної крейсерської швидкості */

            if(current_freq > MAX_FREQ) current_freq = MAX_FREQ;
            if(current_freq < MIN_FREQ) current_freq = MIN_FREQ;

            /* Динамічний запис нового періоду в регістр таймера TIM2 */

            TIM2->ARR = (uint32_t)((SystemCoreClock / 2) / current_freq) - 1;

            /* Генерація крокового імпульсу на драйвер */
        }
    }
}
```

```

HAL_GPIO_TogglePin(SERVO_PORT, SERVO_PULSE_PIN);

step_count++;}

else {

    /* Завершення руху - зупинка таймера */

    HAL_TIM_Base_Stop_IT(&htim2);

    step_count = 0;}}

```

Наведені лістинги коду демонструють практичну придатність розроблених алгоритмічних структур та підтверджують можливість реалізації детермінованого керування високодинамічним сортувальним комплексом на базі обраного мікроконтролера STM32.

3.4 Часовий аналіз та побудова циклограми функціонування роботизованого комплексу

Для забезпечення максимальної продуктивності автоматизованого комплексу та унеможливлення часових колізій між роботою технологічного конвеєра, сенсорних систем та виконавчих механізмів маніпулятора необхідно виконати детальний аналіз динаміки системи у часі. Основним інструментом для координації послідовних і паралельних операцій у гнучких роботизованих осередках є побудова циклограми роботи. Циклограма являє собою графічне відображення логічних станів усіх апаратних компонентів комплексу, суворо прив'язане до єдиної шкали часу в межах одного повного сортувального такту. Це дозволяє оптимізувати тривалість кожної мікрооперації, виявити потенційні програмні чи апаратні затримки та розрахувати граничну пропускну здатність сортувальної лінії.

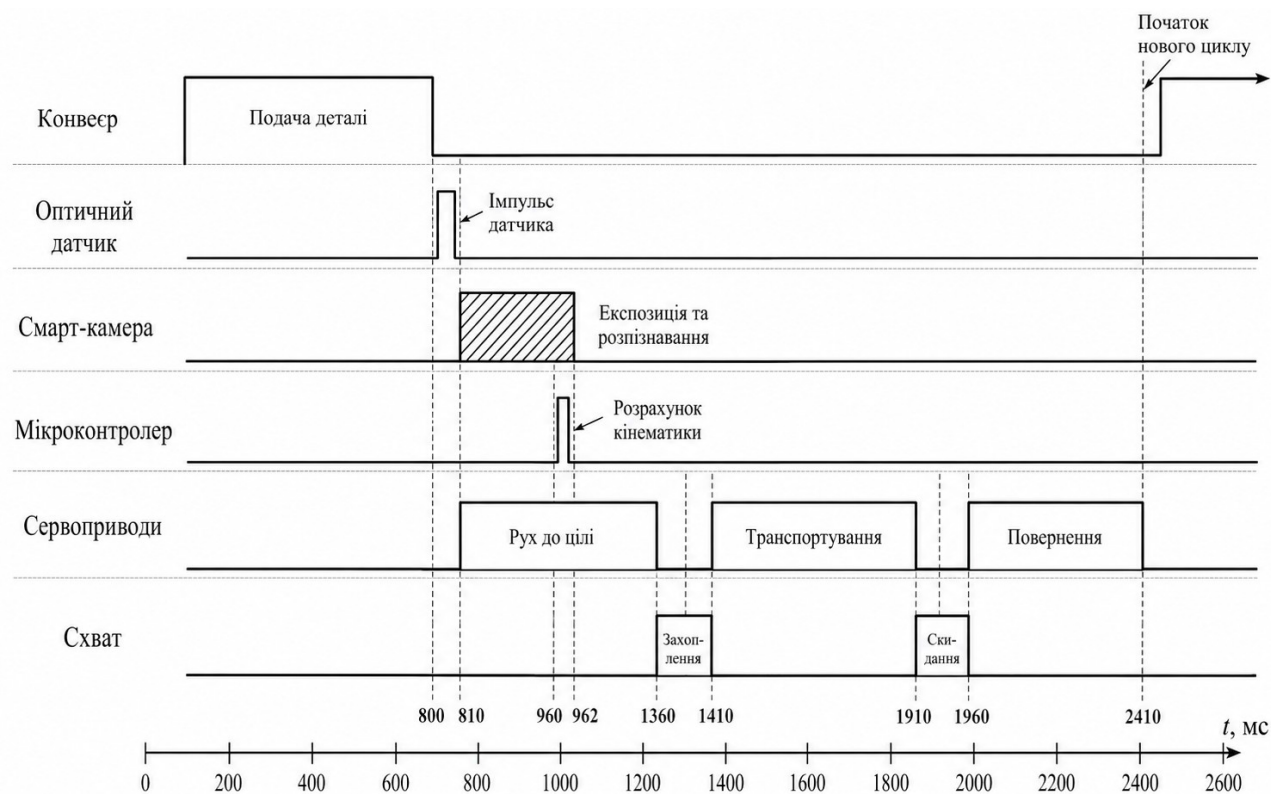


Рис. 3.5 — Програмна циклограма взаємодії компонентів роботизованого комплексу протягом робочого циклу

Один повний такт функціонування системи розпочинається з моменту транспортування об'єкта конвеєрною стрічкою. На початковому інтервалі часу привід конвеєра перебуває в активному стані, забезпечуючи лінійне переміщення деталі, тоді як маніпулятор SCARA очікує у вихідній базовій позиції, а смарт-камера Cognex знаходиться в режимі готовності до захоплення кадру. Фіксація фронтальної кромки деталі високошвидкісним дифузійним датчиком знаменує завершення етапу подачі та миттєво ініціює апаратне переривання в мікроконтролері STM32. За цим тригером керуючий пристрій знімає сигнал дозволу роботи з перетворювача частоти, що призводить до зупинки конвеєрної стрічки у фіксованій координаті. Одночасно з процесом зупинки стрічки, для мінімізації загальних часових витрат, активується контур промислової смарт-камери, яка здійснює

експозицію матриці та внутрішню обробку зображення за вбудованими інструментами локалізації та розпізнавання.

Наступний часовий інтервал відводиться під інформаційний обмін та математичні обчислення в центральному процесорі. Смарт-камера передає сформований пакет даних із геометричними координатами та ідентифікатором класу об'єкта через інтерфейс Ethernet у буфер оперативної пам'яті мікроконтролера. Отримавши ці вектори, обчислювальне ядро активує блок обробки чисел із плаваючою комою (FPU) для миттєвого розв'язання зворотної задачі кінематики. Програмні модулі розраховують необхідні кути повороту для першого і другого плеча маніпулятора, конвертуючи їх у кількість кроків. Цей обчислювальний етап триває лічені мікросекунди завдяки високій тактовій частоті мікроконтролера, після чого розпочинається найдовша фаза робочого циклу — безпосередній фізичний рух виконавчих механізмів маніпулятора.

Динамічна фаза переміщення характеризується синхронною роботою серводрайверів Delta під керуванням траєкторного планувальника. Мікроконтролер починає генерацію імпульсів із плавно наростаючою частотою, відпрацьовуючи розраховану траєкторію за трапецеїдальним профілем. Ланки маніпулятора виходять із нульової позиції та здійснюють прискорений рух до точки захоплення об'єкта, при цьому вертикальна вісь опускає кінцевий ендефектор до рівня деталі. Щойно просторові координати зрівнюються з цільовими, видається дискретна команда на активацію пневматичного або механічного схвата. На циклограмі цей момент відображається як коротка статична пауза для приводів, яка є технологічно необхідною для гарантованого спрацювання елементів схвата та надійної фіксації заготовки.

Заключна фаза робочого такту пов'язана з транспортуванням деталі та поверненням усієї системи у вихідний стан. Маніпулятор здійснює реверсивне переміщення у просторі, переносячи об'єкт у зону відповідного

накопичувального лотка згідно з отриманим кодом класифікації. Після досягнення координати лотка схват розмикається, звільняючи деталь, і ланки маніпулятора за найкоротшою оптимізованою траєкторією повертаються у базову точку очікування. Паралельно з початком руху повернення робота, мікроконтролер відновлює сигнал дозволу для частотного перетворювача, і конвеєрна стрічка знову запускається для подачі наступної деталі. На цьому робочий такт замикається, а сумарний час, витрачений на виконання всіх описаних етапів циклограми, визначає реальну продуктивність розробленої системи автоматизації.

Висновки за розділом

У третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано комплексне проєктування алгоритмічного та програмного забезпечення системи керування автоматизованим сортувальним комплексом. Розроблено загальний детермінований алгоритм функціонування системи, який координує взаємодію конвеєрної лінії, оптичної сенсорики, машинного зору та виконавчих механізмів маніпулятора SCARA. Виконано детальну алгоритмізацію критичних підпрограм: екстреної обробки апаратних переривань, просторової валідації з розв'язанням зворотної задачі кінематики та траєкторного планування рухів за трапецеїдальним профілем швидкості.

Для підсистеми технічного зору здійснено конфігурування промислової смарт-камери Cognex In-Sight 2000 у середовищі EasyBuilder. Налаштовано інструменти локалізації за шаблоном (Pattern Tool) та аналізу ознак (Blob Tools), що дозволило реалізувати надійну ідентифікацію деталей незалежно від їхнього просторового положення на стрічці з подальшою передачею координат по мережі Ethernet. Програмну реалізацію керуючого ядра виконано мовою C/C++ для мікроконтролера STM32 із застосуванням бібліотеки HAL та апаратного співпроцесора FPU. Це забезпечило

мікросекундну швидкодію тригонометричних розрахунків та точне генерування ШІМ-імпульсів для сервоприводів «на льоту».

На основі розробленого програмного забезпечення проведено часовий аналіз та побудовано циклограму функціонування комплексу. Результати аналізу підтвердили абсолютну узгодженість паралельних інформаційно-обчислювальних процесів із фізичним переміщенням ланок, засвідчили відсутність часових колізій та підтвердили розрахункову пропускну здатність лінії на рівні 25 деталей на хвилину.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

4.1 Аналіз умов праці та ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Впровадження автоматизованих роботизованих комплексів у промислове виробництво суттєво підвищує загальний рівень безпеки за рахунок виведення людини з безпосередньої зони виконання технологічних операцій. Проте експлуатація сортувального пристрою на базі маніпулятора SCARA, стрічкового конвеєра та системи технічного зору генерує нові специфічні ризики для обслуговуючого персоналу та операторів лінії. Відповідно до чинних нормативно-правових актів з охорони праці, робоче місце оператора класифікується як таке, що пов'язане з керуванням складними електромеханічними системами. Основним завданням на цьому етапі є ідентифікація всіх потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть впливати на працівника під час штатної роботи комплексу, проведення пусконаладжувальних робіт або технічного обслуговування.

Найбільшу пряму загрозу життю та здоров'ю персоналу становить механічна небезпека, зумовлена наявністю рухомих кінематичних ланок маніпулятора та елементів стрічкового конвеєра. Робоча зона маніпулятора характеризується високою динамікою переміщень, оскільки серводвигуни забезпечують значне прискорення та швидкість руху робочого органу. Потрапляння частин тіла або одягу оператора в зону досяжності робота під час автоматичного циклу може призвести до важких травм внаслідок ударів, затискання між ланками механізму або захоплення кінцевим схватом. Додатковим джерелом механічної травмонебезпеки є приводні та натяжні барабани конвеєра, які створюють зони можливого затягування, а також

ризик падіння сортованих деталей у разі аварійного знеструмлення системи та неконтрольованого розмикання сховата.

Другим за ступенем критичності фактором є небезпека ураження електричним струмом. Електрична схема комплексу поєднує в собі силові кола напругою 220 В змінного струму, які живлять частотний перетворювач стрічкового конвеєра та серводрайвери маніпулятора, а також слабкоструміві кола постійної напруги 24 В і 5 В для живлення центрального мікроконтролера, оптичних датчиків та промислової смарт-камери. Пошкодження ізоляції силових кабелів, пробій на металевий корпус шафи керування або порушення цілісності захисного заземлення несуть пряму загрозу електротравматизму у вигляді термічних опіків, електричного удару або фібриляції серця. Ситуація ускладнюється наявністю металевих конструкцій станини та можливим накопиченням статичної електрики на рухомій стрічці конвеєра в процесі тертя деталей.

Крім того, необхідно обов'язково враховувати вплив психофізіологічних та санітарно-гігієнічних факторів на працездатність оператора. Постійний візуальний контроль за процесом розпізнавання об'єктів через програмний інтерфейс системи технічного зору на моніторі комп'ютера викликає підвищене напруження зорового аналізатора. Тривала концентрація уваги на монотонному процесі візуального контролю сортування може призводити до загальної втоми центральної нервової системи та зниження швидкості реакції на ймовірні аварійні ситуації. Робота мотор-редуктора конвеєра та високочастотна комутація серводрайверів генерують локальний шум виробничого середовища, який хоч і не перевищує гранично допустимих санітарних норм, але за умови тривалого впливу створює додаткове акустичне навантаження на оператора [25].

4.2 Технічні та організаційні заходи безпеки при експлуатації роботизованого комплексу

Основним інженерно-технічним заходом для мінімізації механічних ризиків є просторова ізоляція небезпечних робочих зон сортувального комплексу. Для досягнення цієї мети периметр функціонування маніпулятора SCARA та технологічного конвеєра повинен бути обладнаний стаціонарними захисними огороженнями, виконаними з міцного алюмінієвого профілю та прозорих полікарбонатних панелей. Такі бар'єри унеможливають випадковий фізичний контакт оператора з рухомими ланками робота, зберігаючи при цьому можливість повноцінного візуального контролю за процесом сортування. У зонах, де технологічний процес вимагає відкритого доступу для завантаження або вивантаження деталей, стаціонарні огороження замінюються активними оптоелектронними системами захисту, зокрема світловими завісами безпеки промислового класу. Перетин інфрачервоного променя рукою або тілом працівника миттєво розриває апаратний ланцюг безпеки, ініціюючи екстрене гальмування сервоприводів та конвеєра задовго до моменту можливого контакту з небезпечними вузлами.

Апаратна архітектура системи керування повинна включати виділений контур протиаварійного захисту, який функціонує абсолютно незалежно від програмної логіки центрального мікроконтролера STM32. Цей апаратний ланцюг об'єднує грибоподібні кнопки екстреної зупинки (E-stop) червоного кольору, які розміщуються на головному пульті керування та по всьому периметру потенційного доступу до установки. Натискання будь-якої з цих кнопок призводить до фізичного знеструмлення силових кіл серводрайверів Delta та частотного перетворювача конвеєра через спеціалізовані контактори безпеки, що повністю виключає ймовірність програмного збою та несанкціонованого перезапуску системи. Крім того, конструкція виконавчого

ендефектора маніпулятора має бути спроектована таким чином, щоб у разі раптового зникнення електроживлення або падіння тиску в пневмомагістралі схват залишався у заблокованому (нормально закритому) стані, запобігаючи неконтрольованому падінню важких заготовок на станину чи конвеєр.

Ефективність технічних рішень обов'язково підкріплюється суворими організаційними заходами безпеки. Доступ до конфігураційних параметрів смарт-камери Cognex та програматора мікроконтролера повинен обмежуватися багаторівневою системою паролів для запобігання несанкціонованій зміні обмежень робочої зони, швидкостей та прискорень маніпулятора. До роботи з комплексом допускається виключно кваліфікований персонал, який пройшов спеціалізоване навчання з експлуатації промислових роботів та перевірку знань з охорони праці. На зовнішніх панелях шафи керування та захисних огороженнях обов'язково розміщуються стандартизовані попереджувальні знаки, які сигналізують про автоматичний запуск обладнання та наявність рухомих механізмів, а підлога навколо комплексу маркується сигнальними лініями для чіткого розмежування безпечних проходів та потенційно небезпечної зони обслуговування [26].

4.3 Забезпечення електробезпеки та пожежної безпеки виробничого приміщення

Ефективне функціонування роботизованого сортувального комплексу тісно пов'язане з суворим дотриманням нормативних вимог щодо електробезпеки, оскільки апаратна частина поєднує в собі силові кола змінного струму високої напруги та чутливі слабкоструміві цифрові інтерфейси. Відповідно до правил улаштування електроустановок, виробниче приміщення, де розгортається осередок, за ступенем небезпеки ураження

електричним струмом класифікується як приміщення з підвищеною небезпекою через наявність струмопровідної металевої станини та можливість утворення пилу в процесі транспортування деталей. Для захисту обслуговуючого персоналу від випадкового дотику до живих частин електрообладнання всі силові вузли, включаючи частотний перетворювач Delta MS300 та серводрайвери Delta ASDA-B2, розміщуються всередині герметичної шафи керування із класом захисту не менше ніж IP54. Вхідні лінії живлення оснащуються пристроями захисного вимкнення та автоматичними вимикачами, які миттєво знеструмлюють систему у разі виникнення струмів короткого замикання, теплового навантаження або витоку струму на корпус. Всі кабельні лінії, що з'єднують мікроконтролер STM32 із периферійними пристроями, смарт-камерою Cognex та датчиками SICK, прокладаються у спеціальних гнучких кабель-каналах, що захищає їх від механічних пошкоджень рухомими ланками маніпулятора SCARA та вібраційного впливу конвеєра. Регулярний контроль стану ізоляції провідників та вимірювання її опору є обов'язковим елементом планово-попереджувального обслуговування роботизованої лінії.

Пожежна безпека виробничого майданчика регламентується чинними будівельними та санітарними нормами, згідно з якими приміщення з автоматизованим сортувальним пристроєм за вибухопожежною та пожежною небезпекою відноситься до категорії В або Д. Основними потенційними причинами виникнення загоряння в межах комплексу є тепловий прояв електричного струму при перевантаженні силових ланцюгів двигунів, виникнення великих перехідних опорів у місцях слабого контакту клемних з'єднань або іскріння при апаратних збоях частотного регулятора. З метою профілактики та локалізації пожежонебезпечних ситуацій для монтажу силової та сигнальної мережі використовуються виключно кабелі з мідними жилами у захисній оболонці, яка не підтримує горіння і має низьке димовиділення. Корпус шафи керування, металева конструкція конвеєрної стрічки та опорний каркас маніпулятора підключаються до

загальнозаводського контуру заземлення, що унеможливило накопичення зарядів статичної електрики від тертя рухомої стрічки, які б могли стати джерелом іскроутворення.

Виробнича зона в обов'язковому порядку комплектується автоматичною системою пожежної сигналізації, яка включає оптико-електронні димові сповіщувачі, інтегровані в єдину систему протипожежної захисту цеху. У разі виявлення ознак задимлення або різкого підвищення температури сигналізація не лише активує звукове та світлове оповіщення, а й подає апаратний сигнал на розмикання головного контактора живлення сортувальної лінії. Для первинного гасіння пожежі безпосередньо біля роботизованого осередку встановлюються вуглекислотні вогнегасники, використання яких є технологічно виправданим, оскільки вони не пошкоджують електронні плати мікроконтролера STM32 і смарт-камери, а також дозволяють проводити гасіння електроустановок, що перебувають під напругою, без ризику ураження працівника. Шляхи евакуації персоналу з приміщення залишаються постійно вільними, а на видних місцях розміщуються графічні плани евакуації та покажчики напрямку руху з використанням фотолюмінесцентних матеріалів [27].

4.4 Вимоги безпеки під час технічного обслуговування та пусконаладжувальних робіт

Найвищий рівень виробничого травматизму при експлуатації промислових роботизованих систем фіксується не під час їхньої штатної автоматичної роботи, а в процесі проведення пусконаладжувальних робіт, калібрування сенсорики, очищення механізмів або усунення несправностей. У ці періоди обслуговуючий персонал змушений перебувати безпосередньо в межах небезпечної зони маніпулятора SCARA, свідомо деактивуючи

стаціонарні системи захисту, такі як оптичні бар'єри та блокування дверцят огороження. Для мінімізації ризиків несанкціонованого запуску рухомих ланок або ураження електричним струмом під час ремонту, на роботизованому комплексі впроваджується строга процедура блокування та маркування джерел небезпечної енергії за міжнародним стандартом LOTO (Lockout/Tagout).

Система LOTO передбачає жорсткий організаційно-технічний алгоритм виведення обладнання з експлуатації. Перед входом у робочу зону для проведення механічного обслуговування конвеєра або заміни ендефектора маніпулятора, сервісний інженер зобов'язаний фізично відключити головний рубильник на шафі керування та заблокувати його в положенні «Вимкнено» за допомогою персонального навісного замка. Ключ від замка постійно знаходиться у працівника, що гарантує неможливість випадкової подачі живлення на мікроконтролер STM32, частотний перетворювач чи серводрайвери іншим персоналом або дистанційно через мережу Ethernet. Окрім електричної енергії, обов'язковому блокуванню підлягає пневматична магістраль живлення сховата: вхідний клапан перекривається і фіксується замком, а залишковий тиск у системі стравлюється до атмосферного рівня для запобігання раптовому спрацюванню пневмоциліндрів.

Однак виконання специфічних технологічних операцій, таких як фокусування лінзи смарт-камери Cognex In-Sight 2000, навчання новим просторовим координатам або тестування алгоритмів захоплення, вимагає знаходження інженера в робочій зоні при увімкненому живленні приводів. Для таких випадків апаратна логіка системи керування передбачає переведення комплексу у спеціальний режим ручного налагодження (Teach Mode). Згідно з вимогами стандарту безпеки промислових роботів ISO 10218-1, у цьому режимі програмно та апаратно блокується можливість швидкісних переміщень маніпулятора, а максимальна швидкість руху інструмента (TCP)

жорстко обмежується безпечним лімітом у 250 мм/с. Таке обмеження надає людині достатньо часу для візуальної оцінки небезпеки та прийняття рішення щодо ухилення від зіткнення.

Крім того, переміщення ланок маніпулятора або запуск конвеєрної стрічки у режимі налагодження здійснюється виключно з використанням ручного пульта керування, оснащеного трипозиційним перемикачем згоди (Dead-man's switch). Рух приводів можливий лише тоді, коли оператор утримує перемикач у середньому положенні. У разі виникнення непередбачуваної або аварійної ситуації природна рефлексорна реакція людини — різко відпустити перемикач або, навпаки, панічно стиснути його з силою до третього положення — призведе до миттєвого розриву апаратного ланцюга безпеки та накладання електродинамічних гальм на серводвигуни Delta. Застосування такого комплексу технічних блокувань та організаційних процедур забезпечує всебічний захист життя і здоров'я персоналу на всіх етапах життєвого циклу автоматизованої сортувальної лінії [28].

Висновки за розділом

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи проведено всебічний аналіз умов праці та розроблено комплекс інженерно-технічних і організаційних заходів із забезпечення охорони праці та безпеки життєдіяльності при експлуатації роботизованого сортувального комплексу. У ході виконання роботи ідентифіковано ключові небезпечні та шкідливі виробничі фактори, серед яких найбільшу загрозу становлять механічні ризики від рухомих ланок маніпулятора SCARA і стрічкового конвеєра, небезпека ураження електричним струмом у силових колах та колах керування, а також психофізіологічне напруження зорового аналізатора оператора лінії.

Для нейтралізації механічних ризиків запропоновано просторову ізоляцію робочої зони за допомогою стаціонарних полікарбонатних огорожень та активних оптоелектронних світлових завіс, перетин променів яких призводить до миттєвої зупинки обладнання. Спроектовано незалежний апаратний контур протиаварійного захисту на базі кнопок екстреної зупинки (E-stop), що виключає ризик програмного збою мікроконтролера. У сфері електро- та пожежної безпеки передбачено розміщення силової комутаційної апаратури у герметичній шафі з класом захисту IP54, заземлення всіх металевих конструкцій для відведення струмів витоку та захисту від статичної електрики, а також оснащення робочої зони автоматичною пожежною сигналізацією та вуглекислотними вогнегасниками.

Особливу увагу приділено безпеці персоналу під час нештатних режимів роботи. Обґрунтовано та впроваджено систему блокування та маркування джерел небезпечної енергії за міжнародним стандартом LOTO, що повністю виключає випадковий пуск приводів під час ремонту конвеєра чи сховата. Для етапу пусконаладження та конфігурування смарт-камери передбачено апаратний режим ручного налагодження з обмеженням швидкості робота до безпечного рівня та застосуванням трипозиційного перемикача згоди на пульті керування. Створена система інженерного захисту повністю відповідає чинним нормативно-правовим актам і гарантує безпечні умови праці на всіх етапах життєвого циклу розробленого комплексу.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі успішно вирішено актуальне інженерне завдання розробки та проєктування автоматизованого сортувального комплексу на базі маніпулятора архітектури SCARA з інтегрованою системою технічного зору. На основі комплексного аналізу існуючих робототехнічних рішень доведено, що для швидкісного переміщення деталей у горизонтальній площині найвищу результативність демонструє саме кінематика SCARA, а використання інтелектуальних систем машинного зору є обов'язковим для гнучкої класифікації об'єктів за складними геометричними характеристиками.

У ході проєктування апаратної частини розроблено функціональну структурну та принципову електричну схеми з повним гальванічним розділенням силових контурів приводів від логічних мікропроцесорних ліній. Проведені математичні розрахунки за структурною формулою Сомова-Малишева підтвердили наявність чотирьох ступенів вільного ходу маніпулятора та дозволили побудувати геометричну модель робочого простору, чітко локалізувавши межі максимальної досяжності та внутрішні мертві зони. Обґрунтований вибір сучасної промислової елементної бази, що включає високопродуктивний 32-бітний мікроконтролер STM32F407VGT6, синхронні сервомотори Delta Electronics із 17-бітними енкодерами та смарт-камеру Cognex In-Sight, заклав міцний фундамент для досягнення прецизійної точності позиціонування.

Створене алгоритмічне та програмне забезпечення сформувало надійне детерміноване керуюче ядро комплексу. Детальна алгоритмізація процесів дозволила реалізувати мікросекундне розв'язання зворотної задачі кінематики з використанням апаратного співпроцесора FPU та впровадити ефективний траєкторний планувальник із трапецеїдальним профілем швидкості. Конфігурування інструментів локалізації та розпізнавання смарт-камери в середовищі EasyBuilder забезпечило безпомилкову ідентифікацію деталей

незалежно від їхнього початкового положення на конвеєрній стрічці. Побудована за результатами розробки циклограма функціонування підтвердила абсолютну узгодженість паралельних обчислювальних і механічних процесів, гарантуючи безперебійну розрахункову пропускну здатність лінії на рівні 25 деталей на хвилину.

Для гарантування найвищого рівня промислової безпеки розроблено вичерпний перелік інженерно-технічних та організаційних заходів. Простір роботизованої комірки надійно ізолювано за допомогою стаціонарних полікарбонатних огорожень, оптоелектронних світлових завіс та незалежного апаратного контуру аварійної зупинки E-stop, що діє в обхід програмної логіки мікроконтролера. Впровадження строгої процедури блокування джерел небезпечної енергії за міжнародним стандартом LOTO та використання спеціального апаратного режиму ручного налагодження з обмеженням швидкості інструмента повністю виключає ризики виробничого травматизму під час пусконаладжувальних робіт чи технічного обслуговування. У підсумку, розроблений роботизований сортувальний комплекс являє собою безпечне, гнучке та високоефективне інженерне рішення, яке повністю відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. SO 8373:2021. Robotics — Vocabulary. International Organization for Standardization, 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/75539.html>
2. Siciliano, B.; Khatib, O. Springer Handbook of Robotics. 2nd ed. Springer, 2016. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-32552-1>
3. Festo. What is a SCARA robot? URL: https://www.festo.com/us/en/e/solutions/industrial-automation/scara-robot-id_1304010/
4. Clemson University. Delta Robots and their Applications to Manufacturing. URL: <https://opentextbooks.clemson.edu/me8930/chapter/delta-robots-and-their-applications-to-manufacturing/>
5. International Federation of Robotics. World Robotics — Industrial Robots. Sources & Methods. 2025. URL: https://ifr.org/img/worldrobotics/Sources_Methods_WR_2025_Industrial_Robots.pdf
6. Cognex. Introduction to Machine Vision: A guide to automating process & quality improvements. URL: <https://www.cognex.com/en/tools-and-resources/resource-center/introduction-to-machine-vision-guide>
7. SICK. Sensor Selection Tool. URL: <https://www.rae.ca/wp-content/uploads/SensorSelectionTool.pdf>
8. Zhang, Y.; Lu, Z.; Cao, J. Research on Workpiece Sorting System Based on Machine Vision. Open Journal of Applied Sciences, 2015, 5, 27–33. URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=53164>
9. Springer Nature. Grippers and End Effectors. URL: https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-1-4471-4976-7_96-1
10. SCHUNK. Gripping systems and end-of-arm tooling. URL: <https://schunk.com/us/en/gripping-systems/c/PGR>
11. STMicroelectronics. STM32 Microcontrollers. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>

12. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers — Part 3: Programming languages. International Electrotechnical Commission, 2013. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/4552>
13. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
14. STMicroelectronics. STM32F405xx STM32F407xx Arm® Cortex®-M4 32b MCU+FPU, 210 DMIPS, up to 1 MB flash/192+4 KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 15 communication interfaces, and camera interface. Datasheet. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf>
15. Delta Electronics. ECMA Series AC Servo Motors. Technical Data / User Manual. URL: https://downloadcenter.deltaww.com/en-US/DownloadCenter?CID=06&downloadID=M+Series&itemID=060201&sort_dir=DESC&sort_expr=cdate&v=1&version=ENG
16. Delta Electronics. ASDA-B2 Series AC Servo Drive. User Manual. URL: <https://deltaacdrives.com/Delta-ASDA-B2-User-Manual.pdf>
17. Delta Electronics. Delta Standard Compact Drive MS300 Series User Manual. URL: https://downloadcenter.deltaww.com/en-US/DownloadCenter?CID=06&downloadID=MS300&itemID=060101&sort_dir=DESC&sort_expr=cdate&v=1
18. Cognex. In-Sight 2000 Series Vision Sensors. Datasheet. URL: <https://www.cognex.com/en/products/machine-vision/vision-sensors/in-sight-2000-series>
19. SEW-EURODRIVE. Gearmotor WA20 / DRN.. Product information. URL: <https://www.sew-eurodrive.com/products/gearmotors/gearmotors.html>
20. SICK. W16 Photoelectric Sensors. Product data sheet. URL: https://www.sick.com/media/pdf/5/45/545/dataSheet_WTB16P-24161120A00_121862_6_en.pdf
21. Spong, M. W.; Hutchinson, S.; Vidyasagar, M. Robot Modeling and Control. 2nd ed. Wiley, 2020. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Robot+Modeling+and+Control%2C+2nd+Edition-p-9781119523994>

22. Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L.; Oriolo, G. Robotics: Modelling, Planning and Control. Springer, 2009. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84628-642-1>
23. Leadshine. Closed Loop Stepper Drive and Motor Systems. URL: <https://www.leadshine.com/Products/Closed-Loop-Stepper-Products.html>
24. MEAN WELL. HDR-60 Series DIN Rail Power Supply. Datasheet. URL: <https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=HDR-60>
25. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 08.04.2014 № 248. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0472-14>
26. ISO 10218-2:2025. Robotics — Safety requirements — Part 2: Industrial robot applications and robot cells. International Organization for Standardization, 2025. URL: <https://www.iso.org/standard/73934.html>
27. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електричне устаткування машин. Частина 1. Загальні вимоги. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91653
28. ДСТУ EN ISO 14118:2019. Безпечність машин. Запобігання ненавмисному пуску. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88644

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему:
СОРТУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ НА БАЗІ РОБОТА МАНІПУЛЯТОРА

ДОДАТОК А

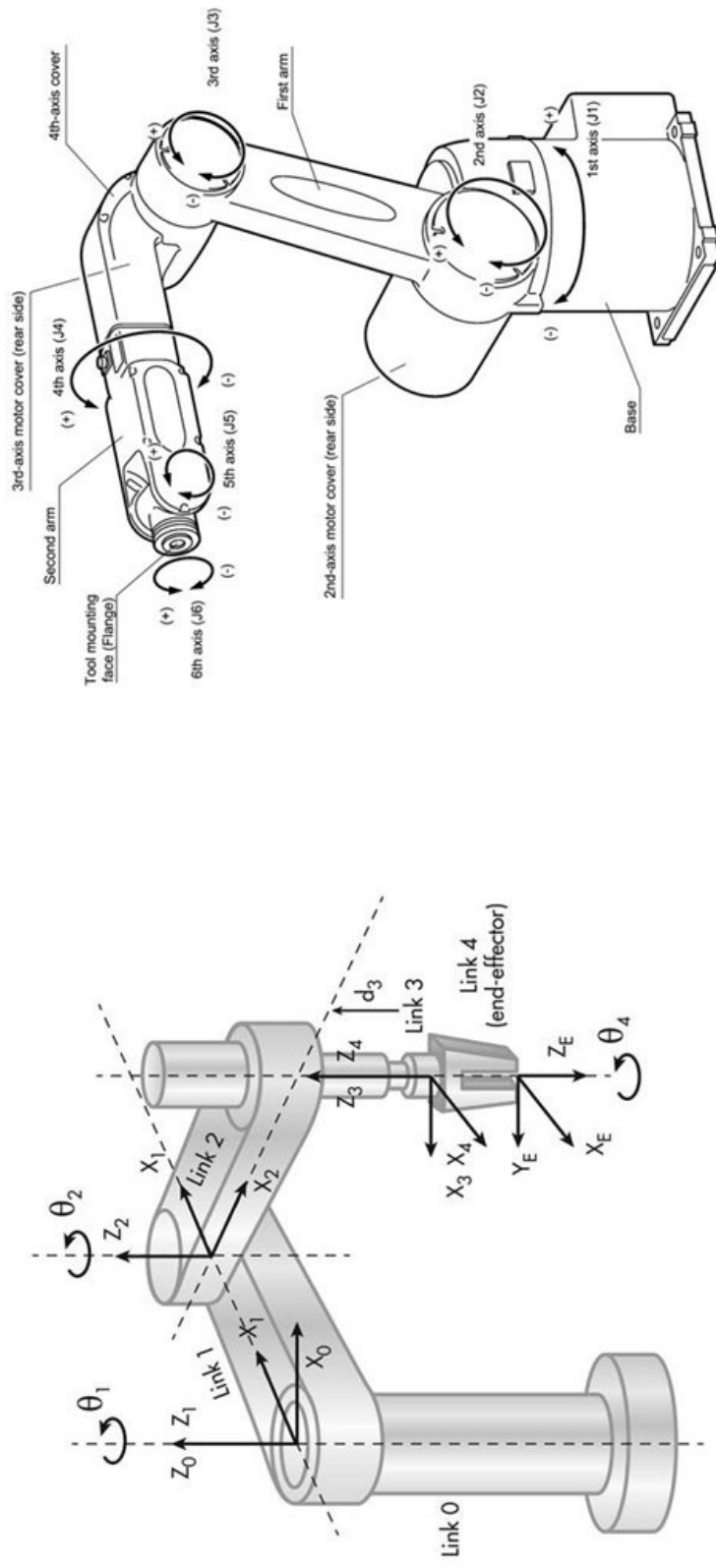
МУЛЬТИМЕДІЙНА ПРЕЗЕНТАЦІЯ

Виконав: студент групи 4317ст3
Прокоф'єв А. Ю.
Керівник: к.т.н., асистент кафедри
Іванов А. В.

Миколаїв – 2026

1

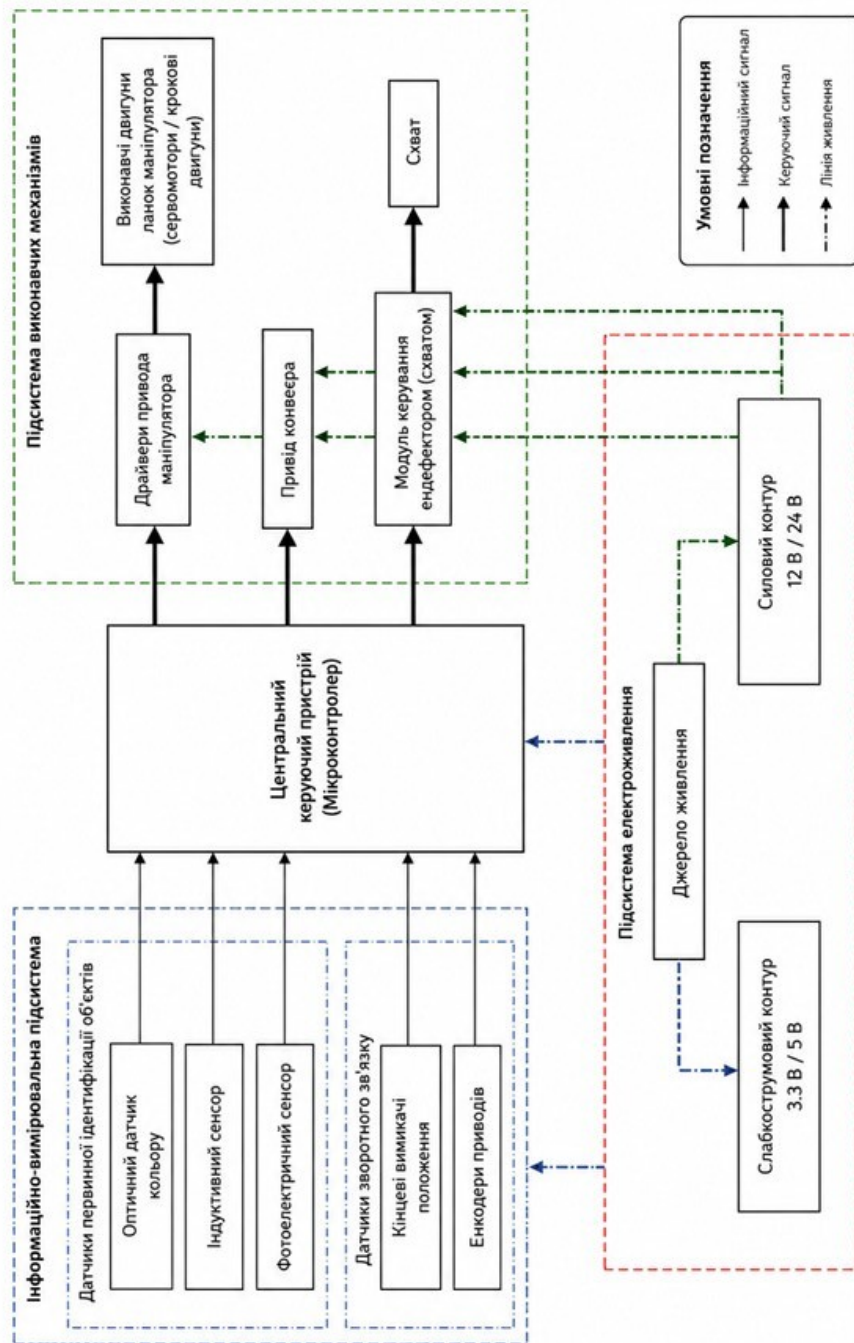
ПОРІВНЯННЯ КІНЕМАТИЧНИХ СХЕМ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ



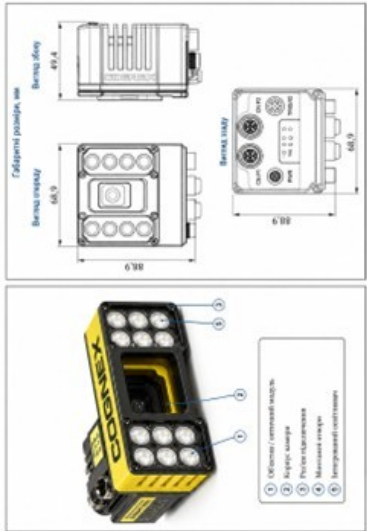
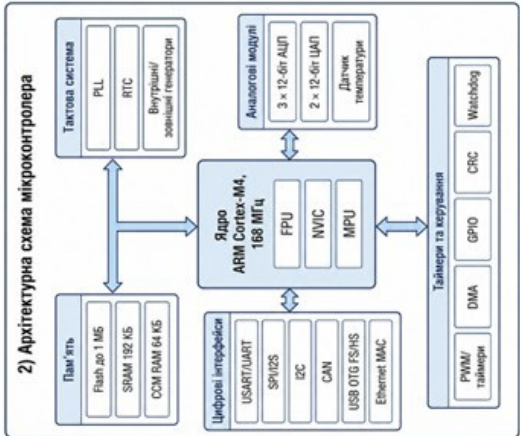
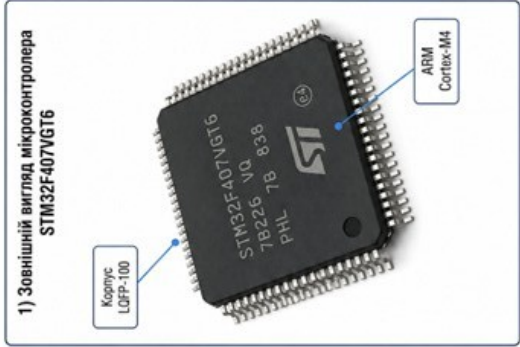
Кінематична схема маніпулятора SCARA

Кінематичні осі та ступені вільного ходу
багатоланкового маніпулятора

СТРУКТУРНА СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ



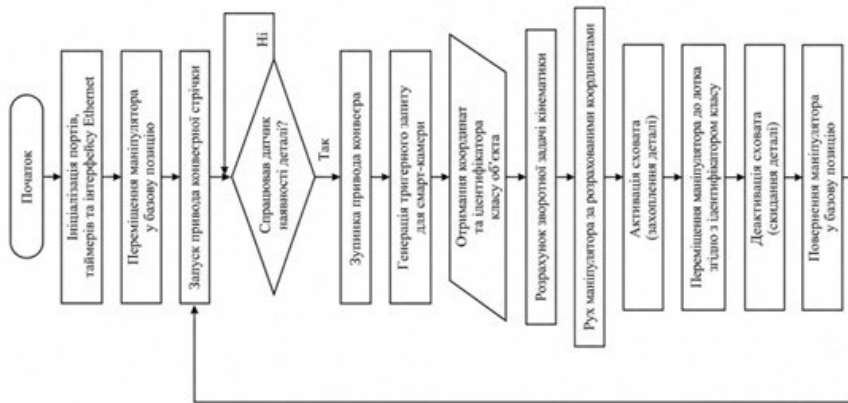
АПАРАТНА БАЗА: ДВИГУНИ, КАМЕРА, МІКРОКОНТРОЛЕР



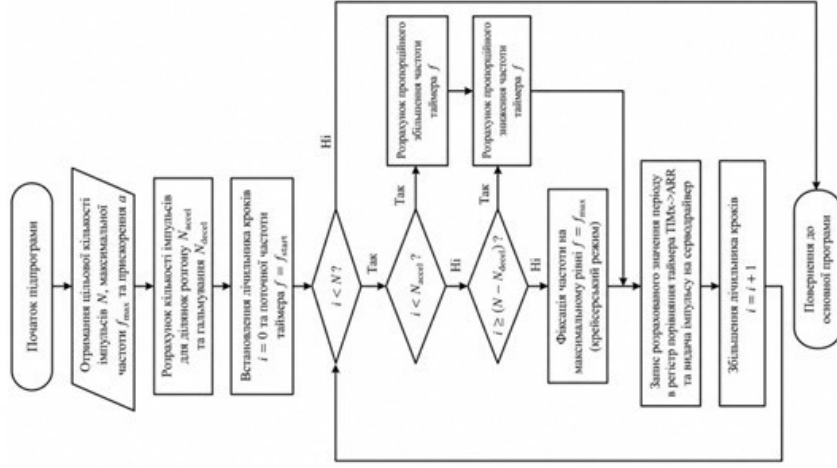
Сервомотор Delta ECMA-C20604RS

Смарт-камера Cognex In-Sight 2000-130C

АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ (БЛОК-СХЕМИ)

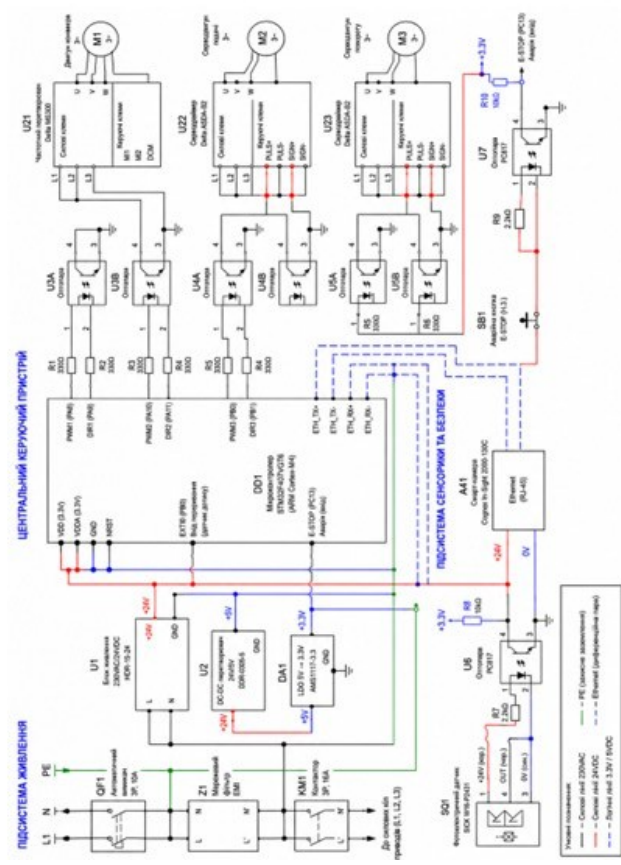


Блок-схема загального алгоритму роботи роботизованого сортувального комплексу

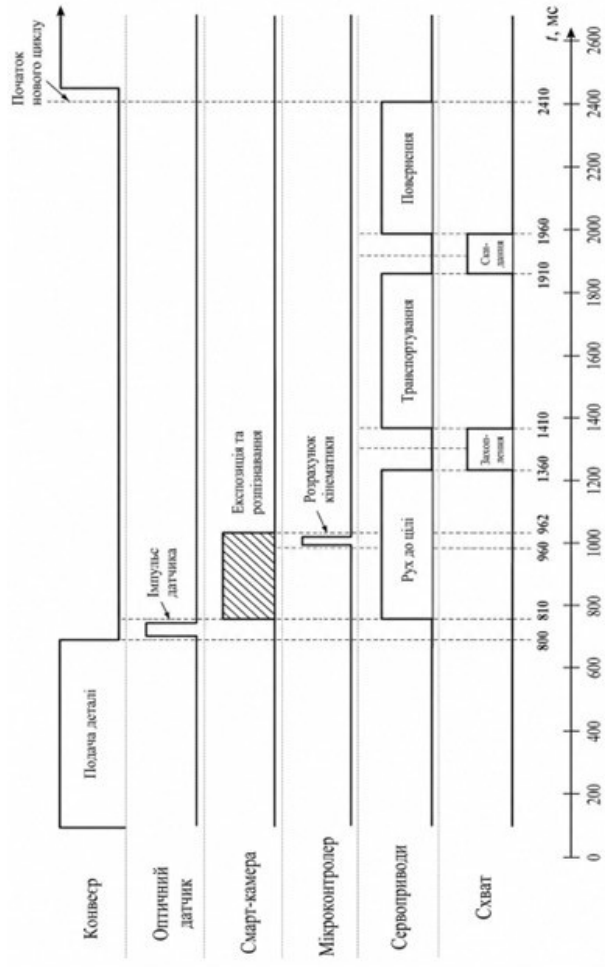


Блок-схема алгоритму керування рухом маніпулятора за профілем швидкості

ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ТА ЧАСОВІ ДІАГРАМИ



Принципова електрична схема підключення керуючого та силового обладнання



Програмна циклограма взаємодії компонентів роботизованого комплексу протягом робочого циклу