

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення роботизованого маніпулятора для автоматизації виробничої операції сортування із використанням технологій комп'ютерного зору

(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,  
групи АКТАКІТ-21-3

Михайло ШЕВЦОВ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Сергій НОВОСЕЛОВ

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

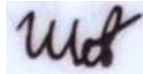
Ігор НЕВЛЮДОВ

(власне ім'я, прізвище)

20 25 р.

Я, Шевцов Михайло Васильович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«02» червень 2025 р.

A small, square image containing a handwritten signature in black ink. The signature appears to be 'Mof' or similar, written in a cursive style.

Михайло ШЕВЦОВ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« 04 » червня 20 25 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Шевцову Михайлу Васильовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення роботизованого маніпулятора для автоматизації виробничої операції сортування із використанням технологій комп'ютерного зору

затверджена наказом університету від 19 травня 2025 р. № 390 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 09 червня 20 25 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Тип захвату – пневматичний \_\_\_\_\_

3.2 Кількість присосок – 1 \_\_\_\_\_

3.3 Вага деталі < 40 г \_\_\_\_\_

3.4 Мова програмування – Python \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Вступ \_\_\_\_\_

4.2 Аналіз конструкцій та технологій для автоматизованого сортування \_\_\_\_\_

4.3 Вибір кінематики маніпулятора \_\_\_\_\_

4.4 Розробка архітектури автоматизованої системи \_\_\_\_\_

4.5 Вибір компонентів для побудови макету \_\_\_\_\_

4.6 Розробка програмних алгоритмів \_\_\_\_\_

4.7 Складання макету \_\_\_\_\_

4.8 Розробка програмного забезпечення \_\_\_\_\_

4.9 Експериментальні дослідження та тестування \_\_\_\_\_

4.10 Висновки \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) \_\_\_\_\_

5.1 Графічний матеріал у вигляді презентації у форматі .pptx (18 с.)

---



---



---



---



---



---



---



---

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

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

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою кваліфікаційної роботи	28.04 – 01.05.2025	виконано
2	Аналіз аналогічних конструкцій та технологій	02.05 – 07.05.2025	виконано
3	Вибір кінематики маніпулятора	08.05 – 10.05.2025	виконано
4	Підбір компонентів для побудови макету	10.05 – 12.05.2025	виконано
5	Розробка програмного забезпечення	13.05 – 20.05.2025	виконано
6	Складання макету	20.05 – 22.05.2025	виконано
7	Проведення експериментальних досліджень	22.05 – 24.05.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	25.05 – 02.06.2025	виконано
9	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	02.06.2025	виконано
10	Подання роботи на рецензію	03.06.2025	виконано
11	Подання роботи на підпис зав. кафедри	04.06.2025	виконано
12	Подання роботи в ЕК	09.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 28 квітня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Михайло ШЕВЦОВ  
(власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Сергій НОВОСЕЛОВ  
(посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 71 с., 1 табл., 33 рис., 3 дод., 32 джерела.

### СОРТУВАННЯ, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, SCARA, МАНІПУЛЯТОР, РОБОТОТЕХНІКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ

Об'єкт розробки – процес автоматизації виробничої операції сортування із використанням робототехнічних систем.

Предмет розробки – технічні та програмні засоби реалізації системи автоматизованого сортування на основі роботизованого маніпулятора та технологій комп'ютерного зору.

Мета розробки – вдосконалення методу автоматизованого сортування деталей шляхом інтеграції роботизованого маніпулятора з системою комп'ютерного зору та оптимізації конструктивних рішень.

Розробка автоматизованої системи сортування на базі роботизованого маніпулятора відповідає Цілям сталого розвитку ООН, зокрема Цілі 9, що передбачає підтримку інновацій та розвиток інфраструктури, а також Цілі 12, яка стосується раціонального споживання і виробництва через підвищення ефективності технологічних процесів. Використання макета системи в освітньому процесі сприяє реалізації Цілі 4 щодо забезпечення якісної освіти.

У роботі розглянуто загальні принципи автоматизованого сортування. Проаналізовано існуючі технології, що застосовуються в сучасних сортувальних системах, зокрема роботизовані маніпулятори та комп'ютерний зір. На основі проведеного аналізу обрано кінематику маніпулятора для автоматизації виробничої операції сортування. Розглянуто структурну схему автоматизованої системи. Виконано підбір технічних засобів для побудови макету. Розроблено програмне забезпечення та алгоритми машинного зору. Створено фізичний макет системи та проведено його експериментальне дослідження.

## ABSTRACT

Explanatory note: 71 p., 1 tables, 33 figures, 3 app., 32 sources.

### SORTING, COMPUTER VISION, SCARA, MANIPULATOR, ROBOTICS, AUTOMATION

The object of development is the process of automating the sorting production operation using robotic systems.

Subject of development - technical and software tools for implementing an automated sorting system based on a robotic manipulator and computer vision technologies.

The purpose of the development is to improve the method of automated sorting of parts by integrating a robotic manipulator with a computer vision system and optimizing design solutions.

The development of an automated sorting system based on a robotic manipulator is in line with the UN Sustainable Development Goals, in particular Goal 9, which provides for support for innovation and infrastructure development, and Goal 12, which relates to rational consumption and production through increased efficiency of technological processes. The use of the system's layout in the educational process contributes to the realization of Goal 4, which is to ensure quality education.

The paper discusses the general principles of automated sorting. Existing technologies used in modern sorting systems, such as robotic manipulators and computer vision, are analyzed. Based on the analysis, the kinematics of the manipulator is selected to automate the sorting production operation. The structural diagram of the automated system is considered. The selection of technical means for building the layout is performed. Software and machine vision algorithms are developed. A physical model of the system was created and its experimental study was carried out.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз конструкцій та технологій для автоматизованого сортування .....	12
1.1 Огляд та аналіз кінематик маніпуляторів для сортування .....	12
1.2 Вибір кінематики маніпулятора для сортування .....	19
1.3 Аналіз кінематики SCARA.....	20
1.4 Застосування комп'ютерного зору в сортувальних системах.....	22
2 Проектування автоматизованої системи сортування .....	28
2.1 Розробка архітектури системи автоматизації.....	28
2.2 Розробка структурної схеми системи .....	31
2.3 Підбір апаратних компонентів системи .....	32
2.3.1 Вибір мікроконтролера.....	32
2.3.2 Вибір компонентів маніпулятора.....	33
2.3.3 Вибір компонентів захватного пристрою .....	34
2.3.4 Вибір компонентів системи збору зображень.....	38
2.3.5 Вибір елементів живлення .....	39
2.4 Розробка схеми підключення.....	40
2.5 Розробка алгоритмів роботи програмного забезпечення .....	41
2.5.1 Розробка системи команд маніпулятора .....	41
2.5.2 Розробка алгоритму роботи програми керування маніпулятора .....	42
2.5.3 Розробка алгоритму роботи програми управління .....	44
2.5.4 Розробка системи керування вакуумним захватним пристроєм на основі ПДД-регулятора.....	45
3 Розроблення макету системи автоматизації.....	50
3.1 Опис механічної конструкції маніпулятора.....	50
3.2 Вибір мов програмування та засобів розробки.....	54
3.3 Опис алгоритмів комп'ютерного зору.....	55

	8
3.4 Розробка програмного забезпечення для мікроконтролера .....	58
3.5 Розробка інтерфейсу користувача .....	59
3.6 Тестування та експериментальні дослідження .....	62
4 Охорона праці .....	65
4.1 Аналіз небезпек і шкідливих факторів .....	65
4.2 Заходи з охорони праці .....	65
Висновки .....	67
Перелік джерел посилання .....	68
Додаток А Апробація результатів .....	72
Додаток Б Код програми .....	73
Додаток В Демонстраційний матеріал .....	75

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЗП – захватний пристрій;

КЗ – комп'ютерний зір;

ОЗК – обернена задача кінематики;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;

САПР – система автоматизованого проектування;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

CNN – convolutional neural network;

SCARA – Selective Compliance Assembly Robot Arm.

## ВСТУП

На сьогоднішній день автоматизація виробничих процесів стала головним рушієм підвищення ефективності промислового виробництва. Завдяки її активному впровадженню процеси стають дедалі швидшими та надійнішими, а промислова продукція більш дешевою та якісною. Саме тому промисловість по всьому світу прагне впроваджувати автоматизацію у багатьох сферах застосувань.

Одним із найбільш актуальних напрямків автоматизації є робототехніка. Цей напрям полягає в інтеграції роботизованих систем у виробничі процеси для заміни або підтримки людської праці. Робототехніка фокусується на розробці автоматичних машин (роботів), здатних автономно виконувати завдання, що потребують високої точності, повторюваності чи роботи в небезпечних умовах.

Для належного виконання завдань в автоматичному режимі, роботи повинні мати засоби збору та аналізу інформації про виробничий процес та навколишнє середовище. Людина використовує для цих задач свій зір – надзвичайно потужний інструмент сприйняття навколишнього світу. Так само як і люди, роботи можуть сприймати та «розуміти» навколишній світ завдяки технологіям комп'ютерного зору та обробки зображень.

Комп'ютерний зір – це сукупність технологій та методів, що використовуються для автоматичного контролю та управління технологічними процесами та роботами на основі аналізу зображень. Застосування технологій обробки зображень для автоматизації технологічних процесів постійно зростає. Традиційне промислове обладнання та машини поступово замінюються сучасними версіями, які поєднують роботизовані системи з автоматичним управлінням на основі комп'ютерного зору.

Сортування об'єктів за різними ознаками є особливо актуальним напрямком застосування подібних робототехнічних систем, оскільки операції сортування й досі часто виконуються вручну, що займає багато часу та

призводить до зниження точності та надійності, у зв'язку зі швидкою втомлюваністю людини. При цьому у світі існують тисячі виробничих підприємств, де сортування об'єктів на основі різних параметрів є життєво важливою частиною виробничого процесу. Таким чином, роботи-сортувальники об'єктів, які працюють за допомогою обробки зображень, можуть значно підвищити ефективність та точність сучасного виробництва, скоротити час виконання операцій сортування, а також заощадити витрати на робочу силу.

Мета розробки – вдосконалення методу автоматизованого сортування деталей шляхом інтеграції роботизованого маніпулятора з системою комп'ютерного зору та оптимізації конструктивних рішень.

Об'єкт розробки – процес автоматизації виробничих операцій сортування із використанням автономних робототехнічних систем.

Предмет розробки – технічні та програмні засоби реалізації системи автоматизованого сортування на основі роботизованого маніпулятора та технологій комп'ютерного зору.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз існуючих конструкцій роботизованих маніпуляторів та технологій машинного зору, що застосовуються для автоматизації сортування;
- розробити структурну схему автоматизованої системи;
- виконати підбір апаратних компонентів для побудови макету;
- розробити програмне забезпечення;
- створити макет системи автоматизації;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно з ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [2].

# 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ

## 1.1 Огляд та аналіз кінематик маніпуляторів для сортування

Роботизовані маніпулятори є важливою складовою сучасних виробничих процесів, оскільки вони дозволяють значно підвищити продуктивність, знизити ризик людських помилок та забезпечити безперебійну роботу виробничих ліній. Вони широко застосовуються в різних галузях промисловості, включаючи машинобудування, електроніку, харчову промисловість, фармацевтику та логістику. Завдяки своїй здатності працювати безперервно, роботизовані маніпулятори можуть виконувати завдання з високою швидкістю та точністю, що робить їх ефективним рішенням для автоматизації сортувальних операцій [3].

Автоматизація за допомогою маніпуляторів дозволяє підприємствам:

- оптимізувати виробничі процеси, мінімізуючи ручну працю та зменшуючи кількість дефектної продукції;
- збільшити швидкість виконання операцій, що особливо важливо на конвеєрних лініях та у великих виробничих комплексах;
- підвищити рівень безпеки, усуваючи необхідність участі людини в небезпечних або монотонних завданнях;
- гнучко адаптуватися до змін у виробництві, що дозволяє швидко переходити від одного типу продукції до іншого [4, 5].

Однією зі сфер застосування роботизованих маніпуляторів є автоматизація сортування продукції. Автоматизовані системи сортування працюють у різних галузях промисловості, забезпечуючи ефективний розподіл товарів та виробів за певними критеріями. Вони здійснюють розподіл деталей на конвеєрних лініях, сортують предмети за формою, кольором, розміром або іншими характеристиками, що дозволяє впорядковувати їх перед подальшою обробкою.

Це особливо важливо в таких галузях, як радіоелектронна, автомобільна та харчова промисловість.

Завдяки швидкій обробці інформації та високій точності виконання завдань, роботизовані маніпулятори здатні значно покращити ефективність сортувальних операцій, зменшуючи витрати та підвищуючи продуктивність підприємства [6].

Ще одним завданням є контроль якості продукції. Завдяки інтеграції з системами комп'ютерного зору маніпулятори можуть проводити візуальний контроль виробів і завчасно відбракувати дефектні деталі. Це сприяє зниженню витрат на повторну обробку та підвищенню якості кінцевого продукту.

Роботизовані маніпулятори, орієнтовані на сортування, незалежно від своїх конструктивних особливостей, здебільшого виконують схожі дії: вони повинні захопити певний виріб, перемістити його в задану точку, при необхідності змінити орієнтацію та викласти або передати далі. У промисловості такі системи знайшли широке застосування, і ринок пропонує великий вибір серійних роботів від відомих світових брендів на кшталт KUKA, ABB, FANUC, Yaskawa, Epson, DENSO чи Universal Robots. Паралельно існує багато спеціалізованих рішень, розроблених під конкретні галузеві завдання, наприклад для надшвидкісного сортування легких об'єктів або ж для роботи зі складними й важкими деталями в автомобільному секторі [7]. Далі розглянуто різні варіанти найбільш поширених конструкцій роботизованих маніпуляторів, які часто зустрічаються в сортувальних системах, і приклади їх практичного використання.

Декартові, або порталні, системи зазвичай використовуються там, де потрібно переміщувати об'єкти в прямокутному робочому просторі з високою точністю (рис. 1.1). Їхня конструкція базується на лінійних осях, часто з використанням кулькових гвинтових передач, що дозволяє мінімізувати люфти й досягти високої повторюваності.

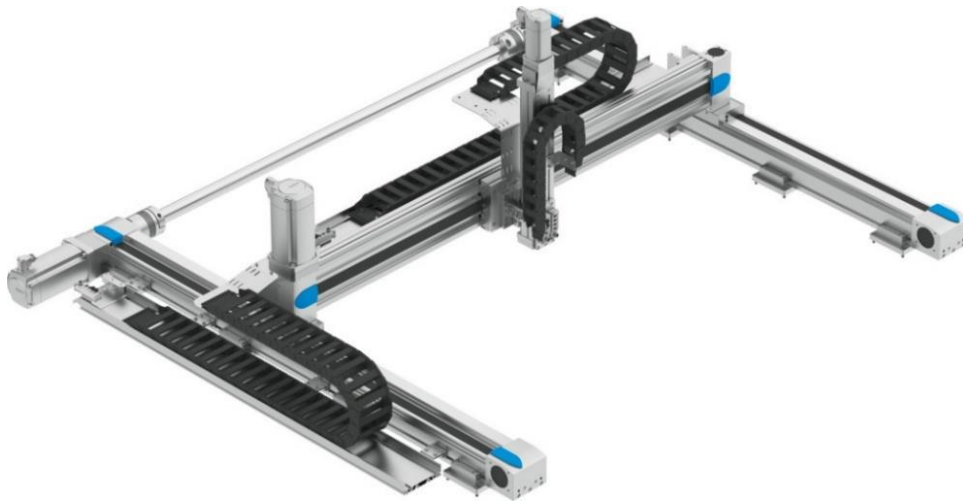


Рисунок 1.1 – Трьохосьовий декартовий маніпулятор від компанії FESTO [8]

Ці роботи можуть виконувати прості рухи вздовж однієї або двох горизонтальних осей та додаткової вертикальної, якщо це передбачено конструкцією. Такі компанії як IAI Corporation, Festo та Bosch Rexroth пропонують модульні порталні рішення, які легко адаптувати під потрібний розмір робочої зони та вантажопідйомність. Найчастіше декартові роботи працюють на великих площах, наприклад у процесах складування або палетизації, де важливо швидко транспортувати об'єкти між різними точками. У логістиці такі роботи корисні для точної розкладки товарів на стелажах чи конвеєрах, а в електронній промисловості – для сортування друкованих плат. Як приклад можна згадати серії FLIP-X та RoboCylinder від IAI, що дозволяють швидко зібрати власну «портальну» конфігурацію, враховуючи необхідну точність і швидкість [9, 5].

Антропоморфні маніпулятори з шістьма обертальними з'єднаннями вирізняються своєю універсальністю й здатністю виконувати складні тривимірні рухи та орієнтаційні операції (рис. 1.2). Велика кількість ступенів вільності дає змогу встановлювати об'єкт під різними кутами, що особливо корисно тоді, коли деталь має складну геометрію або потребує точного позиціонування в просторі.



Рисунок 1.2 – Шестиосьовий робот-маніпулятор FANUC M-1000iA [10]

Такі роботи широко представлені в лінійках FANUC, ABB, KUKA, Yaskawa. Кожен виробник має моделі різної вантажопідйомності — від маленьких настільних роботів, що можуть піднімати всього кілька кілограмів, до великих потужних систем на сотні кілограмів. ABB IRB 120, наприклад, є компактним рішенням з радіусом трохи понад півметра, але водночас з високою точністю, що ідеально підходить для сортування невеликих виробів у чистих приміщеннях. Перевагою таких роботів є можливість інтегрувати системи машинного зору та алгоритми машинного навчання для точного визначення позиції й орієнтації об'єктів. Недоліком може бути складніше програмування та більша вартість, особливо коли йдеться про висококласні моделі з розширеним функціоналом [9, 11].

Delta-роботи відомі своєю рекордною швидкістю роботи і часто застосовуються в харчовій промисловості та там, де потрібно сортувати чи пакувати легкі вироби у великій кількості. Паралельна кінематична схема дає змогу розмістити приводи вище над робочою зоною, скоротивши масу рухомих деталей, що значно підвищує маневреність та прискорення. ABB FlexPicker (IRB 360) є одним із найвідоміших прикладів такої конструкції, де швидкість операцій

може сягати декількох сотень циклів за хвилину, а бачення конвеєрної стрічки за допомогою камер дозволяє роботу «виправляти» траєкторію в режимі реального часу. Схожі рішення пропонують FANUC та Yaskawa (рис. 1.3), орієнтуючись передусім на високошвидкісне сортування продуктових виробів, кондитерських товарів чи невеликих компонентів електронних пристроїв.



Рисунок 1.3 – Delta-робот YASKAWA MPP3H [12]

Хоча Delta-роботи швидкі й точні, їхній робочий простір обмежений зоною під куполоподібною рамою, тож для складних об'ємних деталей чи великої вантажопідйомності вони не завжди оптимальні [13].

Колаборативні роботи призначені для безпечної співпраці з людиною (рис. 1.4). Вони мають вбудовані датчики сил і моментів, що дає змогу контролювати зіткнення та уникати травмування оператора. Такі системи особливо актуальні у виробництвах з неповною автоматизацією, де частину завдань усе ще виконує людина, а іншу частину можна делегувати роботу.

Universal Robots, Doosan Robotics, Hanwha Robotics, Techman Robot та інші пропонують моделі коботів з різною вантажопідйомністю, від легких (кілька кілограмів) до доволі великих, які можуть оперувати об'ємними об'єктами.



Рисунок 1.4 – Колаборативний робот-маніпулятор Universal Robots UR12e [14]

На відміну від класичних промислових роботів, коботи зазвичай не мають надвисокої швидкості, проте в невеликих цехах або на складальних чи сортувальних операціях з малими партіями виробів вони повністю виправдовують себе, адже не потребують громіздких захисних огорожень. Universal Robots UR5, наприклад, часто використовується в сортуванні невеликих партій деталей, коли є потреба в частих переходах від одного типу виробу до іншого, а також у ситуаціях, коли оператор та робот фактично працюють над однією задачею [15].

SCARA-маніпулятори (Selective Compliance Assembly Robot Arm) забезпечують швидке й точне переміщення об'єктів у горизонтальній площині, завдяки обертанню двох послідовних осей. Їх третя вісь – вертикальна лінійна – забезпечує переміщення вгору та вниз, що є важливим для операцій підйому та встановлення компонентів. Така конструкція надає SCARA-роботу селективну гнучкість: він є жорстким у вертикальному напрямку, що забезпечує точність при встановленні компонентів, та гнучким у горизонтальній площині, що дозволяє швидко переміщуватися між точками (рис. 1.5) [16].



Рисунок 1.5 – SCARA-маніпулятор від компанії EPSON [17]

Завдяки своїй конструкції та характеристикам, SCARA-роботи широко використовуються в сортувальних операціях. Їхня здатність швидко та точно переміщувати об'єкти в горизонтальній площині робить їх доцільними для завдань, де необхідно швидко сортувати та розподіляти компоненти або продукти. Так, в електронній промисловості SCARA-роботи застосовуються для складання та сортування дрібних електронних компонентів, забезпечуючи високу швидкість та точність, що підвищує ефективність виробництва.

Основними перевагами SCARA-роботів є їхня висока швидкість, точність та компактність. Вони займають менше простору порівняно з іншими типами роботів, такими як картезіанські або ангулярні маніпулятори, що дозволяє ефективно використовувати виробничу площу. Однак, через обмежену гнучкість у вертикальному напрямку, SCARA-роботи можуть бути менш ефективними в завданнях, де потрібні складні тривимірні маніпуляції або значні вертикальні переміщення.

Отже, на сьогоднішній день ринок пропонує багато готових рішень, що враховують різноманітні технологічні запити. Декартові маніпулятори виявляються оптимальними для простих переміщень і великих площ, SCARA і Delta-роботи вирізняються швидкістю виконання завдань, шестиосьові антропоморфні системи забезпечують найбільшу гнучкість у просторі, а

колаборативні роботи актуальні там, де людина та робот можуть спільно працювати без громіздких огорож. Вибір конкретного варіанта залежить від вимог до швидкодії, точності, розмірів робочої зони, специфіки продукції, що обробляється, та вимог до рухливості в різних площинах.

## 1.2 Вибір кінематики маніпулятора для сортування

Основною вимогою, що висувається до маніпулятора для автоматизації процесу сортування є здатність здійснювати точні, швидкі та повторювані переміщення в горизонтальній площині. Водночас, важливе значення мають такі параметри, як надійність, компактність конструкції та зручність програмування.

У попередньому розділі роботи було проведено огляд та аналіз існуючих кінематик промислових роботів-маніпуляторів, що застосовуються в процесах сортування. На основі проведеного аналізу та з урахуванням вищезазначених вимог для створення автоматизованої системи сортування було обрано використання роботизованого маніпулятора з кінематикою типу SCARA.

У порівнянні з картезіанськими та ангулярними варіантами, SCARA-маніпулятори демонструють кращу динаміку руху завдяки жорсткій конструкції та оптимізованій структурі шарнірних з'єднань. Це забезпечує мінімізацію похибок під час виконання високошвидкісних операцій, що є ключовою вимогою у процесах сортування. Крім того, у зв'язку з легкістю вирішення оберненої задачі кінематики (ОЗК), програмування маніпуляторів цього типу є менш складним, порівняно з ангулярними чи дельта-маніпуляторами з такою ж кількістю ступенів свободи, що значно знижує час на розробку керуючого програмного забезпечення. Також SCARA-маніпулятори відрізняються компактною конструкцією, що робить їх придатними до використання в умовах обмеженого робочого простору. Сукупність перерахованих факторів робить SCARA-маніпулятор оптимальним вибором для автоматизації виробничої операції сортування.

### 1.3 Аналіз кінематики SCARA

Кінематика SCARA-маніпуляторів базується на використанні двох обертальних осей у горизонтальній площині та однієї лінійної у вертикальній для переміщення інструмента або схоплювача. Така конструкція дає змогу досягати високої швидкості операцій «pick-and-place» і водночас зберігати достатню точність позиціонування, що є визначальним фактором у процесах сортування невеликих або середніх за розміром об'єктів. Горизонтальні ланки, які часто називають «плечем» і «ліктем», з'єднані відповідними обертальними суглобами, відповідають за переміщення інструмента в горизонтальній площині, у той час як вертикальна вісь відповідає за його підйом та опускання. Інколи може мати місце додатковий ступінь обертання навколо вертикальної осі, якщо потрібно виконувати розворот деталі [9, 11].

Розглянемо кінематичну схему одного з різновидів SCARA-маніпулятора (рис. 1.6). У даній кінематиці перша вісь є лінійною та відповідає за вертикальний рух  $d_1$ , що дозволяє піднімати та опускати інструмент. Дві основні обертальні осі, позначені  $\theta_1$  та  $\theta_2$  на схемі, розташовані в горизонтальній площині. Вісь  $\theta_1$ , що проходить через основу робота, задає обертання ланки довжиною  $L_1$ , яку часто називають «плечем». Друга обертальна вісь  $\theta_2$  знаходиться в місці з'єднання плеча з наступною ланкою довжиною  $L_2$ , відомою як «лікоть». У деяких конструкціях також зустрічається додаткове обертання навколо осі  $Z$ , якщо потрібна зміна орієнтації схоплювача.

Комбінація цих трьох або чотирьох ступенів свободи (залежно від моделі) є оптимальною для швидкісних «pick-and-place» завдань, адже дві обертальні осі в горизонтальній площині забезпечують широке охоплення робочої зони, а вертикальна вісь разом із можливим обертанням дозволяє піднімати виріб і змінювати його орієнтацію в найпростіший спосіб [18].

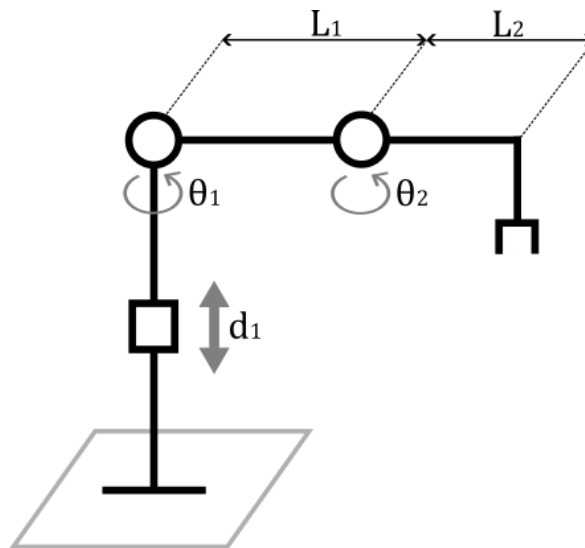


Рисунок 1.6 – Кінематична схема SCARA-маніпулятора

Найчастіше для розрахунку SCARA-кінематики застосовують систему рівнянь, які описують положення виконавчого органу в площині XY з урахуванням кутів  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  та довжин  $L_1$ ,  $L_2$ . Якщо нехтувати додатковим обертанням навколо осі Z, координати можна записати формулою (1.1).

$$\begin{cases} x = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y = L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (1.1)$$

Просте обчислення прямої та оберненої кінематики спрощує налаштування роботизованої системи в сортувальних лініях, де необхідно часто змінювати траєкторії або адаптуватись під новий тип виробів [19].

Таким чином, завдяки своїй селективній гнучкості SCARA-роботи демонструють виняткову швидкодію та точність. Їх жорсткість по вертикалі зменшує коливання при швидких рухах угору та вниз, що є важливим для сортування крихких предметів. У горизонтальній площині другий обертальний суглоб дає змогу розташувати «лікоть» так, аби виконавчий орган займав потрібне положення навіть за обмеженого робочого простору.

#### 1.4 Застосування комп'ютерного зору в сортувальних системах

Комп'ютерний зір – це галузь штучного інтелекту й обробки даних, що вивчає методи й алгоритми, які дають змогу комп'ютерам «бачити» та розуміти візуальну інформацію. Іншими словами, системи комп'ютерного зору здатні сприймати зображення або відео з камер та дані з інших сенсорів та витягати з них змістовні відомості: розпізнавати об'єкти, визначати їхню форму, колір, положення, орієнтацію, виявляти дефекти тощо. Це відкриває можливості для автоматизації завдань, які традиційно виконувала людина, від ідентифікації й сортування предметів до складних операцій контролю якості й керування роботами [20].

Архітектура сучасного сортувального комплексу, що базується на технологіях комп'ютерного зору, передбачає спільну роботу камер (або 3D-сканерів), системи освітлення, обчислювального модуля і програмних засобів для обробки візуальної інформації. Камери формують зображення, на якому можна визначати ключові характеристики об'єктів, тоді як спеціальне освітлення допомагає звести до мінімуму вплив тіней і відблисків. Завдяки цьому зменшуються похибки під час аналізу форми, кольору чи текстур. Отримана з камер інформація передається в обчислювальний модуль, який виконує попередню обробку та аналіз зображень, визначає координати і орієнтацію виробів та надсилає відповідні дані системі керування роботом. Головним етапом є калібрування, під час якого досягається узгодження даних зображення з реальною геометрією робочої зони робота. Це дозволяє точно зіставляти позиції та кути повороту об'єктів із координатами маніпулятора, щоб жодні неточності в перспективі чи фокусуванні не впливали на кінцевий результат сортування. На рисунку 1.7 наведено загальну архітектуру системи комп'ютерного зору з камерою, джерелом освітлення, обчислювальним блоком і роботом-маніпулятором.

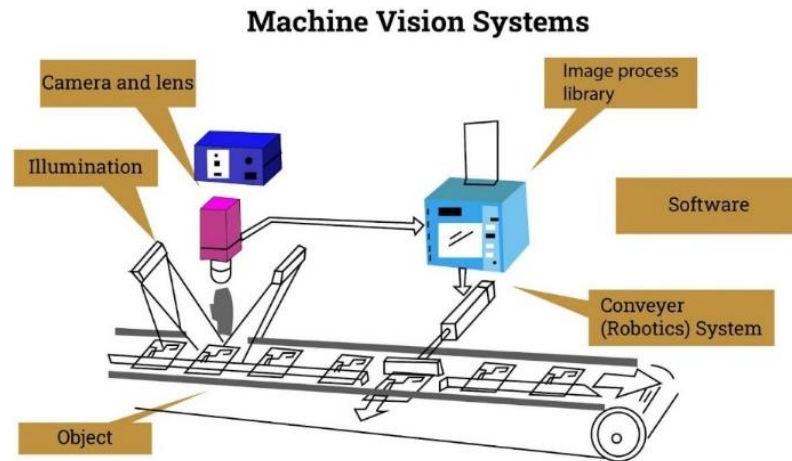


Рисунок 1.7 – Загальна архітектура системи комп’ютерного зору для сортування [21]

У низці проєктів замість звичайних камер використовуються 3D-сканери, що розпізнають просторові параметри об’єкта, доповнюючи інформацію про його рельєф і висоту.

Комп’ютерний зір у сортувальних процесах насамперед виконує завдання виявлення об’єктів і визначення їх розташування, даючи змогу знаходити точні координати і кутову орієнтацію щодо оптичної осі камери. Окрім цього, система має здатність класифікувати об’єкти за зовнішніми ознаками, такими як форма, колір, текстура чи маркування (рис. 1.8). Це особливо корисно в автоматизації робіт з різними видами виробів, коли потрібне сортування за певними ознаками чи відбракування дефектних екземплярів [22].

У випадку галузей, де існують суворі вимоги до якості, як-от у фармацевтиці чи харчовій промисловості, аналіз дефектів і цілісності упаковки стає головним етапом процесу. Комп’ютерний зір здатен розпізнавати пошкодження, нерівності поверхні, невідповідність кольору чи відсутні елементи маркування, що унеможливорює потрапляння бракованої продукції до кінцевого споживача.

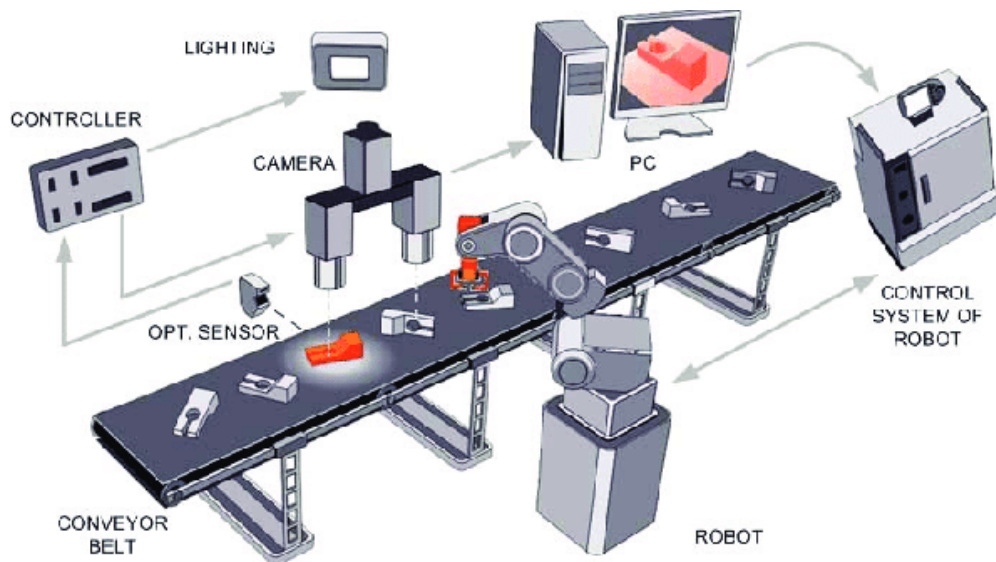


Рисунок 1.8 – Виявлення та локалізація об'єктів на конвеєрі [23]

У більшості випадків використовуються стандартні двовимірні камери, що можуть бути як монохромними, так і кольоровими, залежно від того, наскільки важливим є аналіз кольорових відтінків. Якщо система вимагає зчитування просторових параметрів, тоді вдаються до глибинних сенсорів чи повноцінних 3D-камер, які формують тривимірну модель об'єкта й дозволяють визначати його точну форму та висоту. За високої швидкості руху конвеєра корисними стають лінійні сканери, здатні зчитувати зображення по одній лінії та відтворювати повну картину під час руху предмета. Деякі спеціалізовані виробництва застосовують мультимодальні камери, які, крім видимого діапазону, можуть працювати в інфрачервоному або ультрафіолетовому спектрі, або ж мають вбудовані сенсори аналізу матеріалу, що дає змогу виявляти внутрішні дефекти чи перевіряти склад виробу.

У ситуаціях, де об'єкти можна відрізнити простими методами контрасту, застосовуються базові прийоми комп'ютерного зору, такі як порогова бінаризація чи морфологічні операції. Вони швидко та ефективно розділяють зображення на ділянки з різним рівнем яскравості, що дає змогу ідентифікувати контурні області або виділяти важливі об'єкти на фоні. Такі методи є корисними для розпізнавання простих форм та текстур, а також для попередньої обробки зображень перед більш складним аналізом [24].

Однак у випадках, коли об'єкти мають схожі характеристики або складну текстуру, традиційні методи можуть виявитися недостатньо ефективними. У таких ситуаціях використовуються сучасні алгоритми машинного навчання, зокрема штучний інтелект. Найбільш ефективними підходами виявилися глибокі згорткові нейронні мережі (CNN), які автоматично виокремлюють характерні ознаки об'єктів, навчаючись на великій кількості зразків. Завдяки багаторівневій структурі нейромережі здатні розпізнавати складні патерни, враховуючи текстурні, колірні та просторові особливості зображень (рис. 1.9).

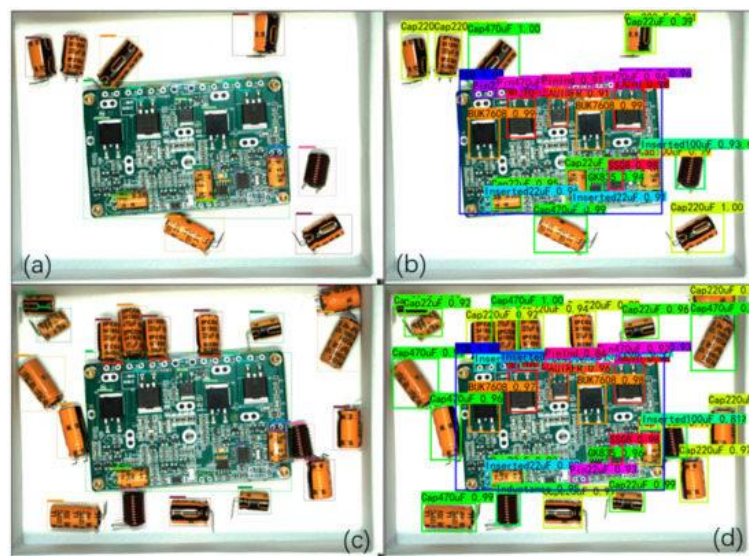


Рисунок 1.9 – Приклад обробки зображення нейронною мережею [25]

Застосування таких методів значно підвищує точність сегментації та класифікації об'єктів, що є дуже важливим у сферах промислової автоматизації, медичної діагностики, автономного водіння, а також у системах відеоспостереження. Крім того, використання глибокого навчання дозволяє адаптувати моделі до нових даних, що забезпечує їхню гнучкість та універсальність у різних прикладних задачах.

Застосування сучасних фреймворків дозволяє отримувати точні результати навіть за умов змінного освітлення, накладання виробів один на одного чи варіативності їх форми. У процесах, де важливо знати не лише контури, а й повну тривимірну структуру, можна залучати модулі 3D-

реконструкції, що працюють із хмарами точок. Такі рішення надають детальнішу інформацію щодо геометрії виробу і дають змогу враховувати нюанси рельєфу під час визначення його орієнтації.

Інтеграція блоку комп'ютерного зору із системою керування маніпулятором вимагає коректного перетворення координат зображення в координати робочого простору робота [26]. Під час калібрування встановлюються відповідності між системою координат камери й реальним розташуванням області дії маніпулятора. Це може відбуватися за допомогою маркерів або спеціальних калібрувальних плит, розміщених у полі зору камер, що дозволяє обчислити перспективні викривлення й точний масштаб. У швидкісних лініях надважливою є мінімізація затримок, тому система має обробляти зображення в режимі реального часу, часто з використанням потужних вбудованих процесорів або відеокарт (рис. 1.10).

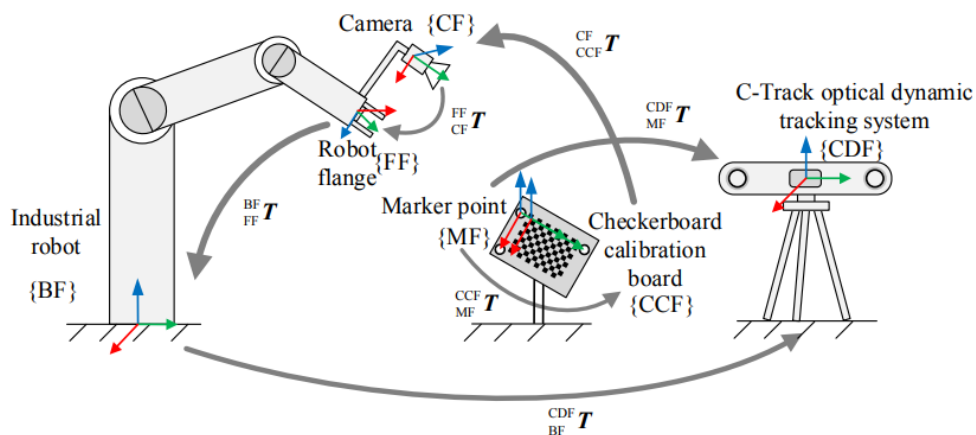


Рисунок 1.10 – Схема інтеграції камери, блоку обробки та робота в процесі калібрування [27]

Багато виробників пропонують готові модулі, що спрощують налаштування камер і формують стандартний інтерфейс для взаємодії з ПЛК або безпосередньо з контролером робота.

У радіоелектронній промисловості алгоритми машинного зору широко застосовуються для автоматизації процесів контролю якості продукції, одним із ключових напрямків якого є сортування виробів за кольором та іншими

візуальними характеристиками. Завдяки використанню спеціалізованих камер і сенсорів системи машинного зору сканують та аналізують виріб у реальному часі, визначаючи його відповідність встановленим критеріям та стандартам. Це дає змогу ефективно відбирати дефектні екземпляри ще до того як вони зійдуть з конвеєра, що значно знижує відсоток дефектної продукції в партії та забезпечує стабільно високу якість товару (рис. 1.11).

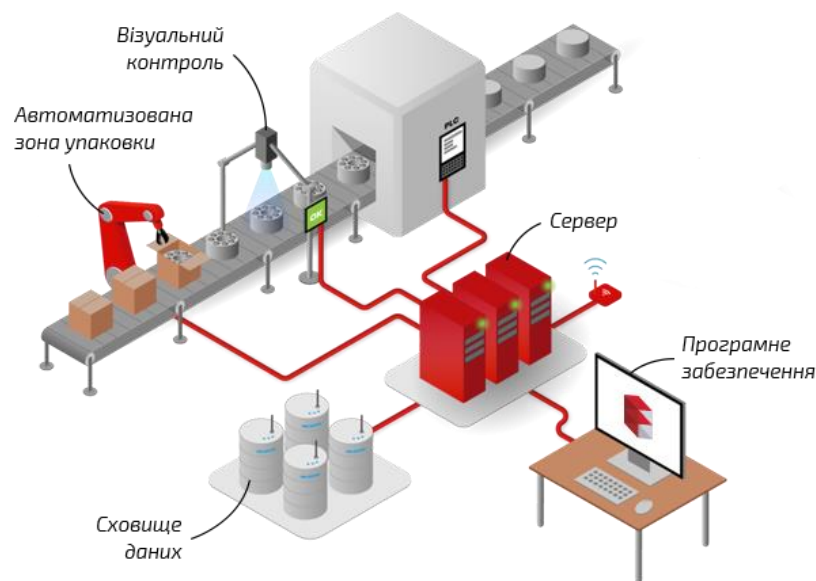


Рисунок 1.11 – Приклад промислового застосування: камера над конвеєром у радіоелектронному виробництві [28]

Впровадження комп'ютерного зору суттєво підвищує точність, гнучкість і надійність сортування, даючи можливість швидко переналаштувати систему на нові об'єкти або вдосконалити контроль якості. Утім, стабільне освітлення, якісне калібрування й достатня обчислювальна потужність залишаються обов'язковими умовами для досягнення високої пропускної здатності та надійності. Також слід враховувати різноманітність форм, текстур і колірних відтінків виробів, а у випадку складних або мінливих умов розглянути залучення нейронних мереж чи мультимодальних сенсорів. При розумній інтеграції в роботизовану систему комп'ютерний зір дає змогу масштабувати автоматизацію та мінімізувати кількість дефектної продукції в потоці.

## 2 ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СОРТУВАННЯ

### 2.1 Розробка архітектури системи автоматизації

Розроблювана система автоматизації сортування являє собою сукупність технічних та програмних засобів, поєднання яких забезпечує зведення до мінімуму участь людини в операціях сортування виробів, деталей, заготовок та інших об'єктів відповідно до цілей виробництва.

Загальний принцип автоматизованого сортування виглядає наступним чином. На першому етапі відбувається збір інформації про об'єкти, що підлягають сортуванню. Це можуть бути як дані з оптичних сенсорів, що дозволяють безпосередньо визначати складні геометричні та інші властивості об'єктів, так і двовимірні зображення зі звичайних відеокамер. Зібрані дані спрямовуються до системи комп'ютерного зору, яка виконує їх інтелектуальну обробку та аналіз на основі спеціалізованих алгоритмів. Задача цієї підсистеми полягає в розпізнаванні об'єктів, визначенні їх просторового розташування та екстракції певних змістовних відомостей про них, таких як колір, форма, розмір, маркування тощо. Набір атрибутів об'єктів, що становлять інтерес, визначається кінцевою метою процесу та необхідними критеріями сортування.

На наступному етапі інформація про сортовані об'єкти поступає в підсистему прийняття управлінських рішень. Вона аналізує отримані дані та приймає рішення про подальші дії, що визначають хід технологічного процесу. Результатом роботи підсистеми є формування команд керування виконавчими пристроями, які безпосередньо здійснюють сортування.

Підсистема прийняття управлінських рішень безпосередньо взаємодіє з підсистемою операторського контролю та управління. Її функція полягає в наданні оператору засобів для моніторингу процесу та здійснення необхідних коригуючих впливів.

Управлінські рішення, прийняті на попередньому етапі, трансформуються в команди, які передаються за допомогою промислової мережі на рівень керування виконавчими механізмами. На цьому рівні застосовуються різні мікроконтролерні системи, задача яких полягає в перетворенні отриманих команд на електричні сигнали керування виконавчими пристроями.

У якості виконавчих пристроїв для сортування передусім застосовуються різні види роботизованих маніпуляторів у поєднанні з відповідними захватними пристроями (ЗП). Роботизовані маніпулятори призначені для виконання операцій переміщення об'єктів між різними точками робочого простору. Захватні ж пристрої слугують для захоплення та відпускання об'єктів, що підлягають сортуванню.

Окремо слід відзначити дуже важливу роль, яку відіграє система ілюмінації (освітлення) для забезпечення ефективного сортування. Вона створює оптимальні умови для роботи алгоритмів комп'ютерного зору, забезпечуючи достатнє та рівномірне освітлення робочого простору маніпулятора. Це гарантує, що базовий рівень якості зображення, необхідний для подальшої обробки та аналізу, залишається високим за будь-яких зовнішніх умов, що сприяє повторюваності результатів роботи системи в різних виробничих середовищах.

Задля досягнення чіткого представлення взаємодії усіх описаних архітектурних елементів, було створено функціональну модель проектованої системи в нотації IDEF0. Розроблена модель наочно демонструє, яким чином інформація про об'єкти сортування надходить у систему, обробляється із застосуванням комп'ютерного зору, аналізується для прийняття рішень та трансформується в команди керування виконавчими механізмами.

На рис. 2.1 представлена контекстна діаграма розробленої функціональної моделі, яка ілюструє загальну архітектуру проектованої системи автоматизованого сортування, а на рис. 2.2 – її декомпозиція, яка розкриває взаємодію ключових підсистем та розподіл функціональних завдань між ними.

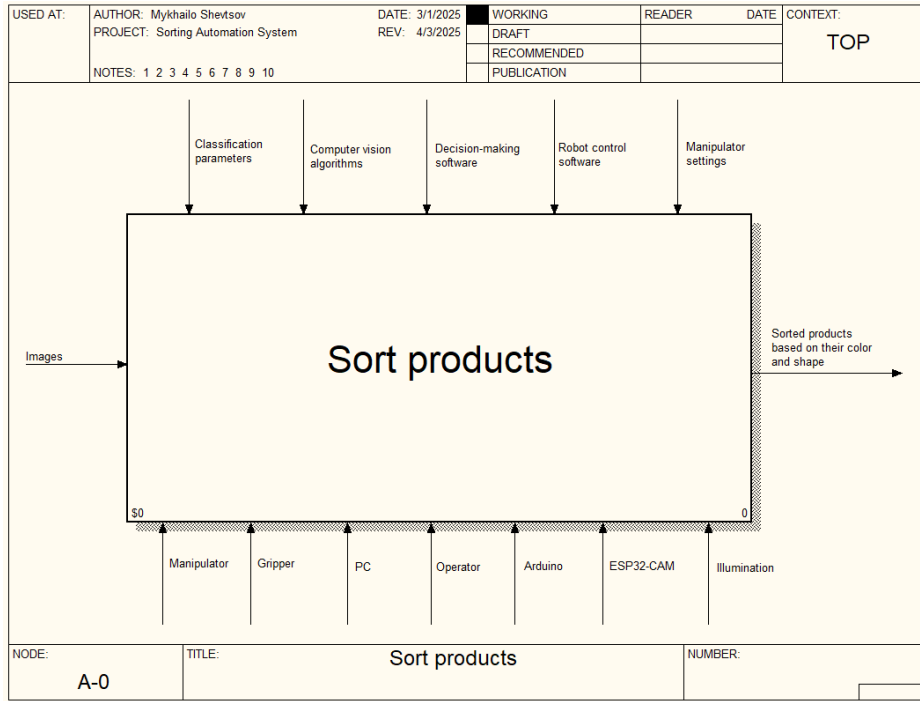


Рисунок 2.1 – Контексна діаграма IDEF0

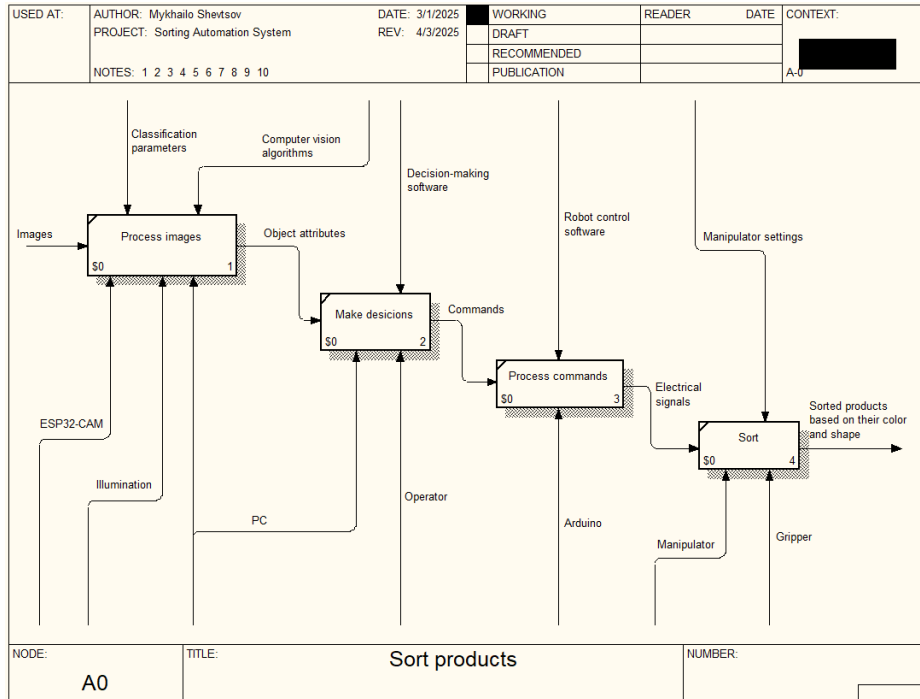


Рисунок 2.2 – Декомпозиція контексної діаграми IDEF0

Розроблена функціональна модель надає структуроване представлення архітектури системи, а її візуалізація наочно демонструє організацію функціональних процесів і механізми взаємодії між елементами, що є дуже корисним для подальшого проектування системи.

## 2.2 Розробка структурної схеми системи

Розроблювана система автоматизації сортування з огляду на її архітектуру має складатися з наступних структурних елементів: роботизованого маніпулятора, захватного пристрою, мікроконтролера для керування виконавчими механізмами, блоку обробки даних та прийняття управлінських рішень, камери, контролера камери, системи освітлення.

Структурна схема проектованої системи представлена на рис. 2.3.

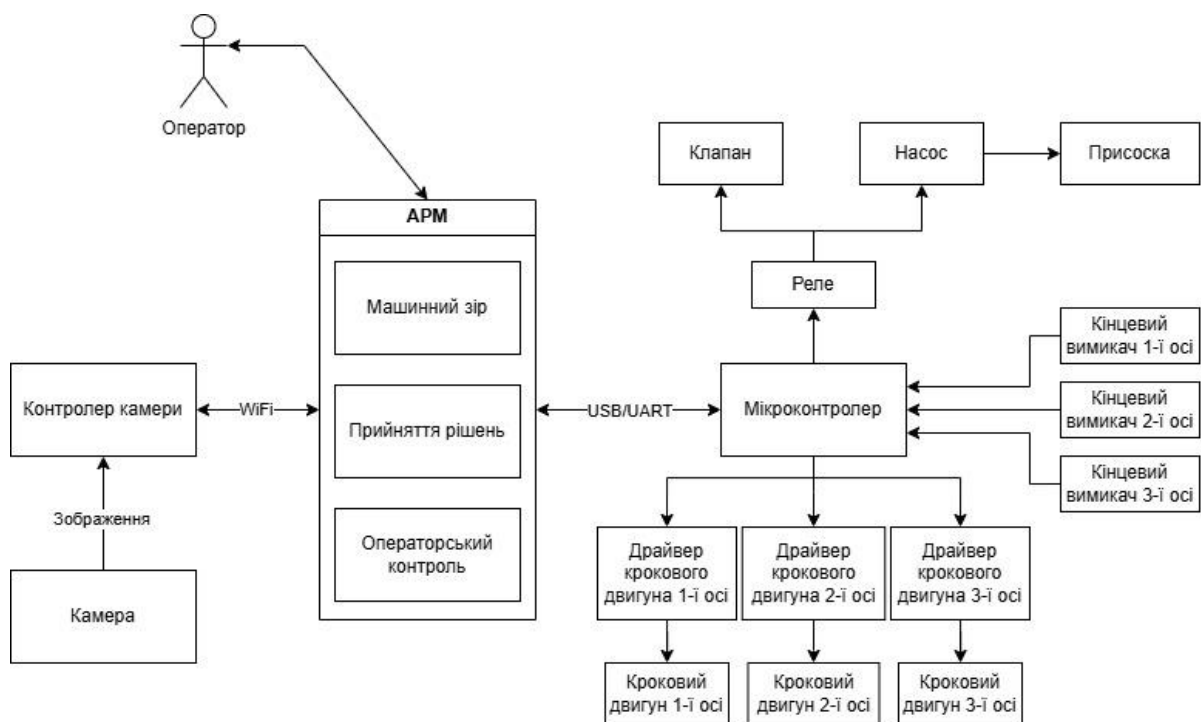


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи

Розроблена структурна схема відображає складові елементи системи та спосіб, у який ці елементи пов'язані між собою. Зі схеми видно, що камера підключається до окремого контролера, який формує зображення та надсилає його за запитом через бездротову мережу Wi-Fi. Блок обробки даних та прийняття управлінських рішень відповідає за інтелектуальну обробку отриманих зображень із застосуванням алгоритмів машинного зору та формування команд, що передаються до мікроконтролерної системи керування через послідовний інтерфейс USB/UART.

До мікроконтролера підключаються всі датчики та виконавчі пристрої, що входять до структури системи. До них належать три крокові двигуни з відповідними драйверами, що забезпечують рухи кожної з трьох осей SCARA-маніпулятора, реле для керування захватним пристроєм та кінцеві вимикачі, що виконують функцію опорних точок для знаходження вихідного положення. Задача цього рівня управління – перетворити команди, що надходять з блоку прийняття управлінських рішень, у відповідні електричні сигнали, які подаються на драйвери приводів маніпулятора та реле керування захватним пристроєм.

## 2.3 Підбір апаратних компонентів системи

### 2.3.1 Вибір мікроконтролера

Найголовнішим критерієм при виборі мікроконтролера є наявність достатньої кількості цифрових пінів для підключення драйверів крокових двигунів, реле та кінцевих вимикачів, що прямо впливає зі структурної схеми системи. Наступним важливим критерієм є обчислювальна здатність та обсяг пам'яті. Мікроконтролер повинен мати достатньо обчислювальних ресурсів для реалізації алгоритмів керування приводами та захватом маніпулятора в режимі реального часу. Також слід враховувати можливість підключення плат розширення, які б дозволили інтегрувати драйвери крокових двигунів за спрощеною схемою, тим самим підвищуючи надійність системи та зменшуючи кількість з'єднувальних провідників. Не менш важливим є і економічний аспект: обраний варіант повинен задовольняти всі перелічені вимоги за мінімальну вартість. Це дозволить уникнути апаратної надмірності та покращити економічний ефект при впровадженні системи на виробництві.

Raspberry Pi є потужним одноплатним комп'ютером, здатним виконувати складні обчислення, зокрема обробку зображень у реальному часі, завдяки підтримці операційної системи та можливостям роботи з мережами Ethernet і Wi-Fi. Проте з огляду на те, що в проекті свідомо розділено завдання комп'ютерного

зору та управління електромеханічною частиною між різними контролерами, об'єднання всіх функцій в одному пристрої виявляється недоцільним.

Плата Arduino Mega являє собою розширену версію мікроконтролера Arduino Uno з більшим об'ємом пам'яті, більшою кількістю цифрових та аналогових входів і додатковими послідовними інтерфейсами, що дозволяє реалізовувати складні алгоритми керування та підключати велику кількість периферійних пристроїв без додаткових мультиплексорів. Проте така продуктивність є надмірною для поставленої в роботі задачі.

Arduino Uno є компактною платформою, що відповідає вимогам завдання завдяки наявності достатньої кількості цифрових пінів, сумісності з платою розширення CNC Shield v3.0 та широкими можливостями програмування. Обчислювальна здатність і обсяг пам'яті цієї плати є достатніми для забезпечення стабільного управління компонентами SCARA-маніпулятора в режимі реального часу. З огляду на архітектуру системи, де завдання розподіляються між окремими контролерами, Arduino Uno є доцільним вибором для керування виконавчими механізмами маніпулятора.

### 2.3.2 Вибір компонентів маніпулятора

Проектований SCARA-маніпулятор відповідно до його кінематичної схеми складається з трьох рухомих ланок. Кожна ланка має бути оснащена власним приводом, що забезпечить незалежне керування її рухом. У якості приводів було обрано використання крокових двигунів. Цей вибір пояснюється їх високою точністю позиціонування та можливістю роботи у відкритому контурі без необхідності зворотного зв'язку. Це спрощує систему керування, так як усуває необхідність використання енкодерів або інших датчиків положення. Для побудови макету було обрано модель крокового двигуна NEMA17 17HS4401. Основні технічні характеристики обраної моделі:

- точність: 1,8 градусів/крок;
- сила утримання: 40 Н·см;
- номінальний струм: 1,7 А;

- опір фази: 1,5 Ом;
- індуктивність фази: 2,8 мГн;
- висота мотору: 40 мм;
- діаметр валу: 5 мм.

Для керування кроковими двигунами, доцільно використовувати спеціалізовані плати розширення, які дозволяють зручно підключати кілька драйверів до основного контролера. Плата розширення спрощує організацію підключення, зменшує кількість провідників та допомагає знизити складність конструкції. Вона також часто включає додаткові можливості для керування живленням та налаштування параметрів роботи драйверів.

Однією з таких плат, підтримуваних Arduino Uno, є CNC Shield v3.0. Найчастіше її використовують для невеликих фрезерних верстатів з числовим програмним управлінням, 3D-принтерів, лазерних граверів тощо. Але також вона є корисною в будь-якому проєкті, де постає необхідність керувати кроковими двигунами з високою точністю.

Поряд з платою розширення необхідно також обрати відповідні драйвери, які забезпечать стабільну роботу, достатню потужність і можливість мікрокрокового режиму для плавного руху крокових двигунів. Враховуючи простоту підключення та підтримку мікрокроків до 1/16, оптимальним вибором є драйвер A4988. Він сумісний з платою розширення CNC Shield v3.0, що дозволяє ефективно інтегрувати його в систему керування маніпулятором.

### 2.3.3 Вибір компонентів захватного пристрою

У проєктованій системі для виконання операцій захоплення об'єктів було обрано використання захватного пристрою вакуумного типу. Структурно вакуумний ЗП складається з електричного компресора, присоски та клапана. Принцип його роботи виглядає наступним чином. Компресор створює розрідження в контурі захоплення. Присоска безпосередньо взаємодіє із захоплюваним об'єктом та з'єднує його з вакуум-генератором. Клапан включається між компресором та присоскою та комутує повітряний потік. При

вимкненій напрузі він сполучає присоску з компресором, а при подачі живлення – з’єднує її з атмосферою, таким чином керуючи подачею та скиданням вакууму. Описаний принцип продемонстровано на рис. 2.4.

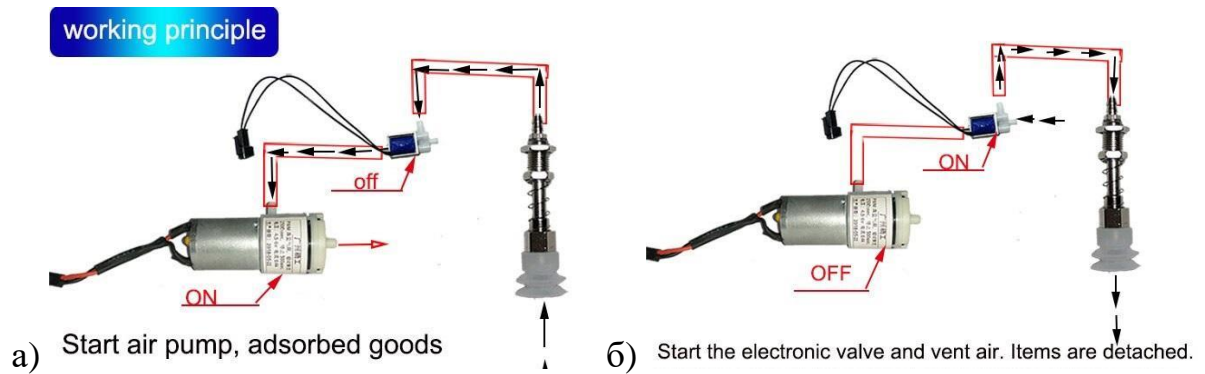


Рисунок 2.4 – Принцип роботи вакуумного ЗП (а – захоплення об’єкта, б – відпускання) [29]

Отже, згідно з описаним принципом напруга на компресор та клапан має подаватися по чергові. Цього можна досягти за рахунок використання реле та підключення позитивного контакту компресора до нормально закритого (NC) контакту реле, а позитивного контакту клапана – до нормально відкритого (NO).

У якості клапана для побудови макету було обрано трипозиційний електромагнітний клапан, зовнішній вигляд якого представлено на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Трипозиційний електромагнітний клапан

Для керування ЗП було обрано одноканальний модуль реле з можливістю перемикання рівня та максимальним силовим навантаженням при постійному струмі DC 30V/10A. Зовнішній вигляд обраного модуля наведено на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Модуль реле

Головною умовою стабільної роботи ЗП слугує спільна робоча напруга всіх компонентів системи. Також необхідною умовою є використання присоски достатнього діаметру та компресора, здатного створювати достатній рівень вакууму. Від цих параметрів залежатиме абсолютне значення утримуючої сили, а отже, й максимальної маси об'єктів, які ЗП зможе безпечно піднімати та утримувати [30]. Розрахунок цього показника здійснюється за формулою (2.1):

$$m = \frac{4P_U N \mu d^2}{5S}, \quad (2.1)$$

де  $m$  – маса деталі [кг];  
 $d$  – діаметр присоски [см];  
 $P_U$  – рівень вакууму [бар];  
 $N$  – кількість присосок;  
 $S$  – коефіцієнт безпеки;  
 $\mu$  – коефіцієнт тертя.

Значення коефіцієнта тертя  $\mu$  між вакуумною присоскою і деталлю необхідно визначати заздалегідь шляхом проведення належних тестів. Проте для оцінки можна обрати типове значення коефіцієнту тертя між матеріалом промислових присосок та пластиком ( $\mu = 0,5$ ) [30].

Під час використання вакуумних присосок вирішальну роль відіграють багато чинників, як-от їх розмір і форма, обробка поверхні та жорсткість деталі (деформація). Тому рекомендується під час розрахунків закладати коефіцієнт безпеки  $S$ , як мінімум, рівним 2. Якщо припускається повертання або

перевертання деталі, то необхідно закласти коефіцієнт безпеки 2,5 або вище, щоб компенсувати результуючі обертальні сили [30].

У розроблюваному макеті застосовується одна присоска, тому  $N$  приймається рівним 1, а максимальна маса деталей – 40 г (0,040 кг). Таким чином, результуюча формула (2.2) для підбору необхідних компонентів схоплювача виглядає наступним чином:

$$P_U d^2 = \frac{5Sm}{4N\mu} = \frac{5 \cdot 2 \cdot 0,04}{4 \cdot 1 \cdot 0,5} = 0,2 \rightarrow P_U d^2 = 0,2 \quad (2.2)$$

Відповідно до результатів проведених розрахунків було обрано компресор, представлений на рис. 2.7, та діаметр вакуумної присоски рівним 6 мм (0,6 см).



Рисунок 2.7 – Електричний повітряний компресор

Основні технічні характеристики обраної моделі:

- номінальна напруга: 10,8-13,2В;
- номінальний струм: < 280mA;
- повітряний потік без навантаження 3,0 л/хв;
- максимальний тиск: 420 мм рт ст. (0,56 бар).

Отже, згідно з формулою (2.2) обрана комбінація присоски та компресора мають забезпечити надійне транспортування пластикових об'єктів масою до 40 г, що є прийнятним у рамках розроблюваного макету.

Після розрахунку діаметру присоски необхідно обрати її тип. Для проєктованої системи було обрано застосування вакуумної присоски типу гармошки, зовнішній вигляд якої показано на рис. 2.8.



Рисунок 2.8 – Присоска

Цей вибір пояснюється придатністю присосок цього типу до маніпулювання деталями з нерівними поверхнями, можливістю компенсації різниці висот та здатністю до обережного захоплення легко пошкоджуваних деталей.

#### 2.3.4 Вибір компонентів системи збору зображень

Система збору зображень складається з наступних апаратних компонентів: камери, контролера камери та системи освітлення. Основним критерієм при виборі цих компонентів є здатність забезпечити достатню якість зображення для задач розпізнавання об'єктів у робочій зоні маніпулятора.

У якості модуля камери було обрано плату ESP32-CAM, яка об'єднує мікроконтролер ESP32 та камеру OV2640. ESP32 має вбудований двоядерний процесор Tensilica LX6 з тактовою частотою 240 МГц, підтримку бездротових інтерфейсів Wi-Fi та Bluetooth, а також достатній об'єм оперативної пам'яті (520 КБ SRAM). Камера OV2640 забезпечує отримання зображення з роздільною здатністю до 1600×1200 пікселів (UXGA), що є достатнім для виявлення та класифікації об'єктів у межах задач сортування. Перевагами ESP32-CAM є низька вартість та наявність широкої спільноти розробників.

Для формування стабільного освітлення робочої області, необхідного для зменшення впливу тіней, шумів, відблисків та зовнішніх джерел світла, застосовуються світлодіодні стрічки білого кольору з нейтральною температурою світла. Таке освітлення має забезпечити повторюваність роботи алгоритмів машинного зору за мінливих зовнішніх умов, а також полегшити обробку кадрів шляхом усунення небажаних відблисків, тіней та шумів.

### 2.3.5 Вибір елементів живлення

У таблиці 2.1 наведено перелік основних споживачів потужності в розроблюваній системі із зазначенням їх кількості та електричних параметрів, що впливають на енергоспоживання.

Таблиця 2.1 – Розрахунок загальної потужності

Компонент	Струм, А	Напруга, В	Кількість	Споживана потужність
Двигун	1,5	12	3	54
LED-стрічка	0,75	12	2	18
Насос	0,28	12	1	3,36
Клапан	0,22	12	1	2,64
Arduino Uno	0,06	5	1	0,3
ESP32-CAM	0,35	5	1	1,75
Модуль реле	0,06	5	1	0,3
Разом	-	-	-	80,35

З таблиці 2.1 випливає, що загальна потужність, споживана всіма компонентами системи, становить приблизно 80 Вт. З урахуванням пікових режимів роботи та можливих коливань напруги, для забезпечення стабільної роботи системи рекомендовано залишити запас потужності в межах 15-20% від максимально можливого навантаження. Таким чином оптимальним є вибір блока живлення на 12В і 8А (96 Вт), оскільки він забезпечує достатній запас потужності для компенсації пікових навантажень та стійкої роботи системи.

Оскільки модуль ESP32-CAM потребує живлення 5 В, а система в цілому живиться від джерела з вихідною напругою 12 В, для модуля обрано використання понижувального перетворювача напруги типу DC-DC (buck-конвертер). Він забезпечує стабілізацію напруги на необхідному рівні та захищає модуль від можливих перепадів живлення.

## 2.4 Розробка схеми підключення

Після підбору всіх необхідних апаратних компонентів було розроблено схему їх підключення. Розроблена схема представлена на рис. 2.9.

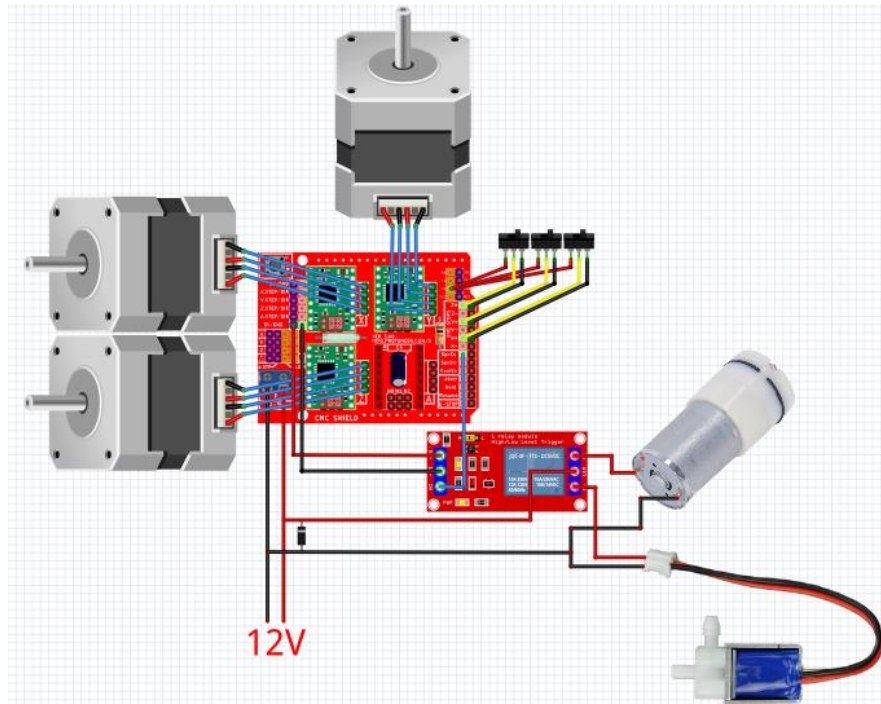


Рисунок 2.9 – Схема підключення

До плати розширення CNC Shield підключаються три крокові двигуни через драйвери A4988, що забезпечують управління їхнім обертанням, та три кінцеві вимикачі, які виконують функцію опорних точок для знаходження вихідного положення маніпулятора. Живлення на всю систему подається від джерела постійного струму з напругою 12 В. Також у схемі відображено підключення модуля реле, який дозволяє комутувати струм для керування захватом. З метою захисту електронних компонентів від зворотної напруги, що виникає внаслідок комутації індуктивних навантажень (зокрема, електромагнітного клапана та двигуна постійного струму, що є складовою частиною компресора), у схемі додатково передбачено використання зворотного діода, який підключено паралельно до цих виконавчих пристроїв у відповідній полярності.

## 2.5 Розробка алгоритмів роботи програмного забезпечення

### 2.5.1 Розробка системи команд маніпулятора

З метою забезпечення простого для розуміння та реалізації зв'язку з системою керування маніпулятора було розроблено спеціальну систему команд, які передаються мікроконтролеру системою керування вищого рівня. Ця передача здійснюється через послідовний інтерфейс. Команди керування є текстовими та мають наступний формат:

КОМАНДА [АРГ1] [АРГ2] [АРГ3] [АРГ4]...

Вони складаються із символічних токенів, розділених між собою пробілами. Перший токен кодує функцію, яку має виконати маніпулятор, а всі наступні представляють собою числові значення – аргументи цієї функції.

На основі цього формату було розроблено систему команд для управління маніпулятором. Нижче наведено перелік команд та відповідних їм аргументів з коротким поясненням до кожної з них.

`turn a b c` – приведення ланок маніпулятора в стан, що задається абсолютними узагальненими координатами для кожної ланки (a,b,c) (для лінійної ланки – координати задаються у мм, для обертальних – у град);

`move x y z` – переміщення схоплювача в точку з координатами (x,y,z);

`mvxy x y` – переміщення схоплювача в точку з координатами (x,y) лише в горизонтальній площині;

`movz z` – переміщення схоплювача в точку з координатою z лише у вертикальній площині;

`grip s` – захоплення або відпускання об'єкта схоплювачем (у залежності від значення аргументу s: 1 – захоплення, 0 – відпускання);

`wait t` – затримка t мілісекунд;

`home` – запуск процедури пошуку вихідного положення за опорними точками спрацювання кінцевих вимикачів;

`q` – термінова зупинка будь-якої виконуваної операції.

## 2.5.2 Розробка алгоритму роботи програми керування маніпулятором

На рис. 2.10 наведено блок-схему розробленого алгоритму роботи програми керування маніпулятором.

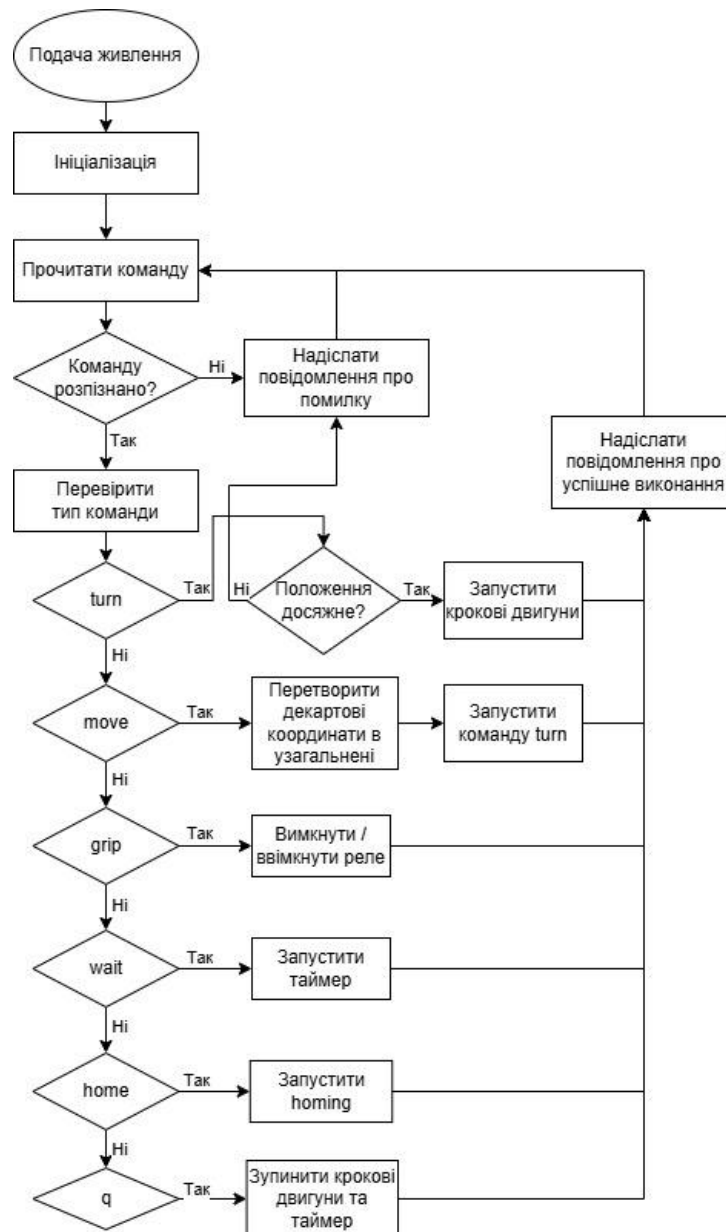


Рисунок 2.10 – Блок-схема алгоритму керування маніпулятором

Розроблений алгоритм складається з двох етапів: ініціалізації (setup) та основного циклу (loop). Ініціалізація відбувається одноразово при подачі живлення на мікроконтролер. На цьому етапі встановлюються режими роботи

входів та виходів, вмикаються двигуни та задаються параметри їх руху, такі як максимальна швидкість та прискорення.

Після ініціалізації програма переходить у режим очікування команд з послідовного порту. Якщо команда надійшла, вона інтерпретується згідно з форматом описаним у попередньому пункті роботи.

Якщо отримана команда вимагає обертання суглобів (turn), то значення цільових кутів перевіряються на відповідність допустимим межах для кожного суглоба. При позитивному результаті запускається процедура приведення двигунами відповідних суглобів до заданих положень. Завершення руху фіксується тоді, коли всі двигуни досягли своїх цілей.

У випадку команд, що задають переміщення в прямокутній системі координат (move, mvxu, movz), значення координат спершу аналізуються на досяжність із точки зору кінематичних та механічних обмежень маніпулятора. Якщо положення допустиме, запускається алгоритм вирішення ОЗК, який визначає кути повороту суглобів маніпулятора, необхідних для досягнення заданого положення в декартовій системі координат. Отримані кути передаються на приводи так само, як і у випадку прямої команди обертання (turn).

Команда керування схоплювачем (grip) керує станом захватного пристрою (через реле) відповідно до вказаного аргументу.

Команда очікування (wait) запускає таймер на заданий проміжок часу, під час якого система перебуває в пасивному режимі.

Команда знаходження початкового положення (home) ініціює процедуру пошуку опорних точок (homing). Кожен двигун починає рухатися в напрямку спрацювання кінцевого вимикача. Після досягнення точки спрацювання виконується переміщення в задану початкову позицію.

Команда термінової зупинки (q) негайно зупиняє будь-яку виконувану операцію з метою запобігання аварійним ситуаціям.

Після виконання будь-якої дії система надсилає через послідовний порт повідомлення про успіх чи помилку виконання команди. Цикл постійно повторюється, підтримуючи готовність до виконання наступних команд.

### 2.5.3 Розробка алгоритму роботи програми управління

На рис. 2.11 представлено блок-схему розробленого алгоритму роботи програми управління.

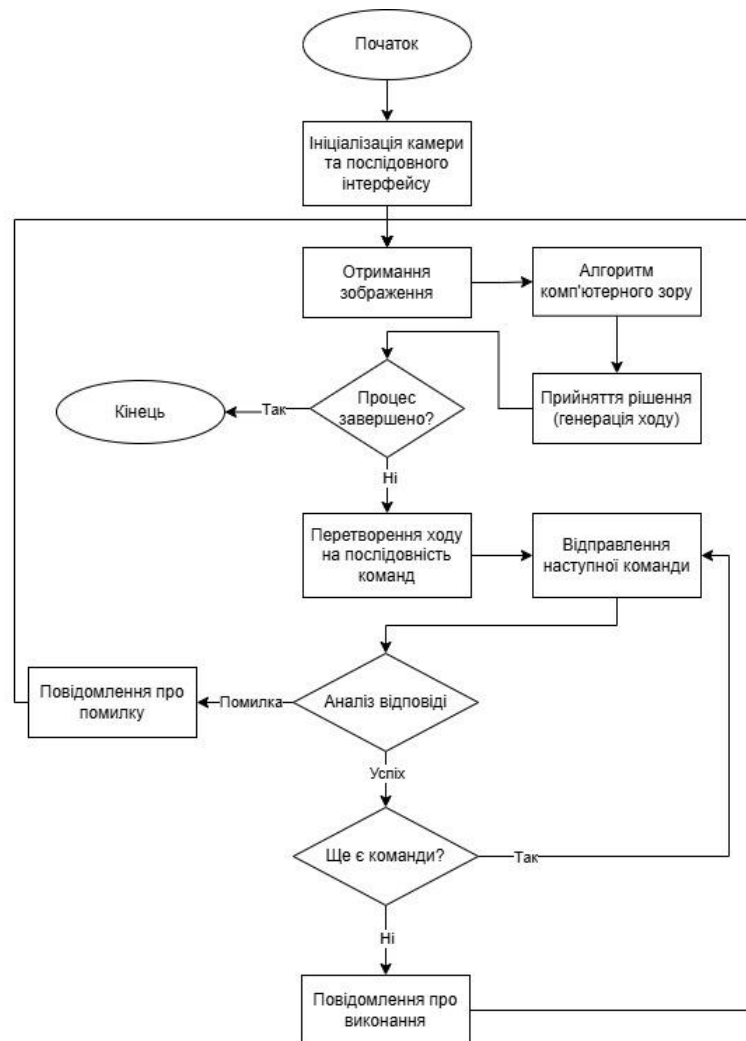


Рисунок 2.11 – Алгоритм роботи програми управління

Програма управління розпочинає роботу зі встановлення зв'язку з контролером камери та послідовним інтерфейсом, після чого продовжує працювати в циклічному режимі. У циклі вона отримує зображення з контролера камери та обробляє його із застосуванням алгоритму машинного зору, задача якого полягає в розпізнаванні деталей, що перебувають у робочій зоні мапіюлятора, а також визначенні їх форми, кольору та просторового розташування. Далі програма згідно з прийнятими критеріями сортування,

поточним станом процесу та його кінцевою метою приймає рішення щодо подальших дій. Відповідно до прийнятого рішення вона генерує послідовність команд, які по черзі відправляються маніпулятору через послідовний інтерфейс. Після виконання чергової команди приймається та аналізується відповідь від системи керування маніпулятором. У разі виникнення помилки під час виконання генерується відповідне повідомлення на інтерфейсі оператора. Якщо відповідь сигналізує про успішне завершення виконання команди, то перевіряється наявність наступної команди для виконання, і якщо вона є, то процес продовжується, а якщо ні – генерується повідомлення про завершення процесу сортування.

2.5.4 Розробка системи керування вакуумним захватним пристроєм на основі ПІД-регулятора

ПІД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор) є одним із найпоширеніших типів систем автоматичного регулювання, що використовується для забезпечення точного і стабільного керування технічними об'єктами. Він забезпечує підтримання контрольованої величини на заданому рівні шляхом безперервного обчислення і формування керувального впливу на об'єкт, що регулюється.

У контексті розроблюваної системи автоматизації сортування ПІД-регулятор може використовуватися для керування вакуумним захватним пристроєм. Він дозволяє адаптивно змінювати зусилля захоплення об'єкта залежно від його фізичних характеристик, забезпечуючи надійне утримання без ризику втрати або пошкодження.

Для забезпечення формалізованого опису принципу роботи ПІД-регулятора в системі керування пневматичним ЗП доцільно розглянути його математичну модель. Такий підхід дозволить не лише глибше зрозуміти логіку регулювання, а й надати основу для чисельного моделювання, підбору параметрів та подальшої оптимізації алгоритму керування.

У загальному вигляді, керувальний сигнал  $u(t)$ , що формується ПІД-регулятором, визначається рівнянням (2.3):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

де  $e(t) = r(t) - y(t)$  – похибка регулювання, тобто різниця між заданим значенням  $r(t)$  та фактичним значенням контрольованої величини  $y(t)$ ;

$K_p$  – коефіцієнт пропорційної складової, що визначає ступінь миттєвої реакції на похибку;

$K_i$  – коефіцієнт інтегральної складової, яка усуває систематичне відхилення від встановленого значення;

$K_d$  – коефіцієнт диференціальної складової, що забезпечує випереджальне регулювання для зменшення перерегулювання та коливань.

У контексті вакуумного захвату система, яку регулює ПІД-регулятор, може бути апроксимована як лінійна система першого або другого порядку. Поведінка тиску в контурі захвату описується рівнянням (2.4):

$$\frac{dy(t)}{dt} + ay(t) = bu(t) \quad (2.4)$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти, що залежать від фізичних параметрів пневмосистеми.

У дискретному випадку, що характерний для реалізації на мікроконтролері, безперервні операції замінюються скінченними різницями. Таким чином, дискретна форма ПІД-регулятора може мати вигляд (2.5):

$$u[k] = u[k - 1] + K_p(e[k] - e[k - 1]) + K_i T_s e[k] + \frac{K_d}{T_s} (e[k] - 2e[k - 1] + e[k - 2]) \quad (2.5)$$

де  $T_s$  – період дискретизації;

$k$  – номер поточної ітерації.

Застосування цієї моделі дозволяє налаштувати керування захватом так, щоб зусилля прикладалося плавно та точно, відповідно до характеристик об'єкта. Це критично важливо для забезпечення адаптивності та надійності системи сортування, яка працює в умовах змінних параметрів і потребує високої точності під час маніпуляцій з об'єктами.

Одним із найпоширеніших емпіричних методів налаштування ПІД-регулятора є методика Зіглера-Ніколса, яка базується на експериментальному визначенні параметрів критичної стійкості системи. Цей підхід дозволяє швидко підібрати значення коефіцієнтів  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , що забезпечують достатню швидкодію та стабільність регулювання, не вдаючись до складного математичного моделювання об'єкта керування [31].

Методика складається з двох етапів. На першому етапі інтегральна та диференціальна складові ПІД-регулятора вимикаються (тобто  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0$ ), і система працює в режимі чисто пропорційного регулювання. Коефіцієнт пропорційності  $K_p$  поступово збільшується до тих пір, поки система не почне здійснювати стійкі гармонійні коливання. Значення  $K_p$ , за якого спостерігається така поведінка, називається критичним коефіцієнтом  $K_{cr}$ , а період цих коливань – критичним періодом  $T_{cr}$  [31].

На другому етапі, відповідно до табличних рекомендацій Зіглера-Ніколса, визначаються значення всіх трьох коефіцієнтів регулятора [31]. Для класичного ПІД-регулятора ці значення розраховуються за формулами (2.6):

$$K_p = 0,6 \cdot K_{cr}; \quad T_i = 0,5 \cdot T_{cr}; \quad T_d = 0,125 \cdot T_{cr} \quad (2.6)$$

де  $T_i = \frac{K_p}{K_i}$  – час інтегрування, а  $T_d = \frac{K_d}{K_p}$  – час диференціювання. Звідси можна вивести формули для коефіцієнтів ПІД-регулятора (2.7):

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}; \quad K_d = K_p \cdot T_d \quad (2.7)$$

З метою проведення імітаційного моделювання системи автоматичного керування було побудовано її структурну схему в програмному середовищі Simulink (рис. 2.12).

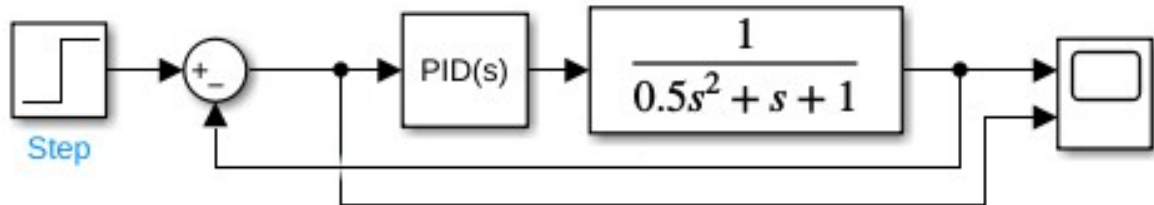


Рисунок 2.12 – Структурна схема автоматизованої системи

У процесі експериментального налаштування системи було встановлено, що критичний коефіцієнт  $K_{cr}$  дорівнює приблизно 2,5, а період критичних коливань  $T_{cr}$  становить 1,8 секунди. Підставляючи ці значення у формули, отримаємо:

$$K_p = 0,6 \cdot 2,5 = 1,5$$

$$T_i = 0,5 \cdot 1,8 = 0,9 \rightarrow K_i = \frac{1,5}{0,9} \approx 1,67$$

$$T_d = 0,125 \cdot 1,8 = 0,225 \rightarrow K_d = 1,5 \cdot 0,225 \approx 0,3375$$

Отже, остаточні налаштовані значення коефіцієнтів для реалізації ПІД-регулятора становлять:

$$K_p = 1,5; \quad K_i \approx 1,67; \quad K_d \approx 0,34$$

Ці параметри можуть бути використані в ПЗ мікроконтролера для формування сигналу керування ЗП через ШІМ (широтно-імпульсну модуляцію).

Для перевірки стабільності системи було проведено серію експериментів, у яких досліджувалася реакція регулятора на типові відхилення: раптову зміну

заданого значення (ступінчастий вхід). У кожному випадку вимірювалися основні параметри якості регулювання, зокрема: час встановлення, максимальне перерегулювання та стала похибка. На рис. 2.13 представлено графіки реакції системи керування.

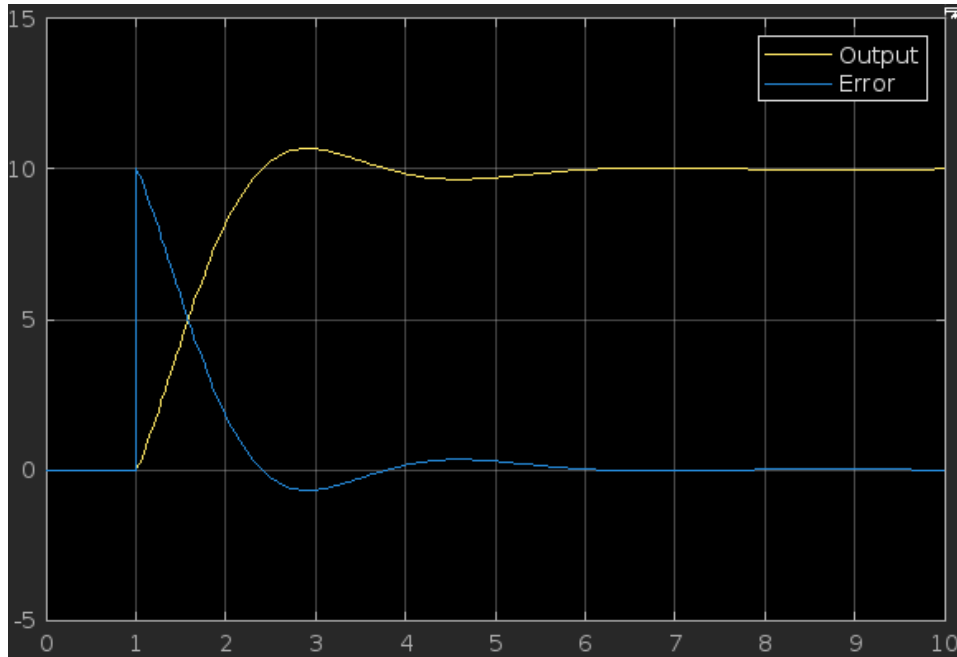


Рисунок 2.13 – Графіки реакції системи керування (вихід, стала похибка)

У випадку ступінчастої зміни референтного значення система демонструвала типову аперіодичну реакцію другого порядку. Значення перерегулювання не перевищувало 10%, що відповідає припустимим технічним нормам для подібних систем. Час встановлення, протягом якого система входила в допуск  $\pm 5\%$  від заданого значення, становив приблизно 2-3 секунди, що свідчить про достатню швидкодію при збереженні стабільності. Остаточна похибка за інтегральної дії регулятора прагнула до нуля, що підтверджує здатність системи точно досягати цільового значення.

Таким чином, результати оцінки якості управління свідчать про те, що впровадження системи керування на базі ПІД-регулятора може забезпечити задовільну точність, швидкодію, стійкість і адаптивність. Це дозволяє гарантувати високу надійність і повторюваність дій вакуумного захвату в умовах реального виробничого середовища.

### 3 РОЗРОБЛЕННЯ МАКЕТУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

#### 3.1 Опис механічної конструкції маніпулятора

Конструкція розроблюваного робота-маніпулятора, як впливає з його кінематичної схеми, включає три рухомі осі: одну вертикальну лінійну та дві обертові горизонтальні.

Вертикальна лінійна вісь забезпечує переміщення роботизованої кінцівки маніпулятора у вертикальному напрямку. Вона реалізується за допомогою крокового двигуна, який з'єднується гнучкою муфтою з ходовим гвинтом, та рухає гайку, на якій закріплюється сама рухома кінцівка. Для фіксації та стабілізації її руху використовуються лінійні підшипники, що ковзають по напрямних алюмінієвих стрижнях. Хід різьби обраного для макету гвинта складає 8 мм. Це значення надалі буде використано у програмному забезпеченні.

Дві обертові осі забезпечують рух захвату маніпулятора в горизонтальній площині. Вони реалізуються за допомогою крокових двигунів, закріплених на рухомій платформі вертикальної осі. Двигуни здійснюють обертання відповідних ланок за допомогою ремінної передачі. Тривимірні моделі ланок передбачають наявність зубчастих шківів для натягу ременів. На рисунку 3.1 наведено 3D-моделі шківів із зазначенням кількості зубців кожного з них.

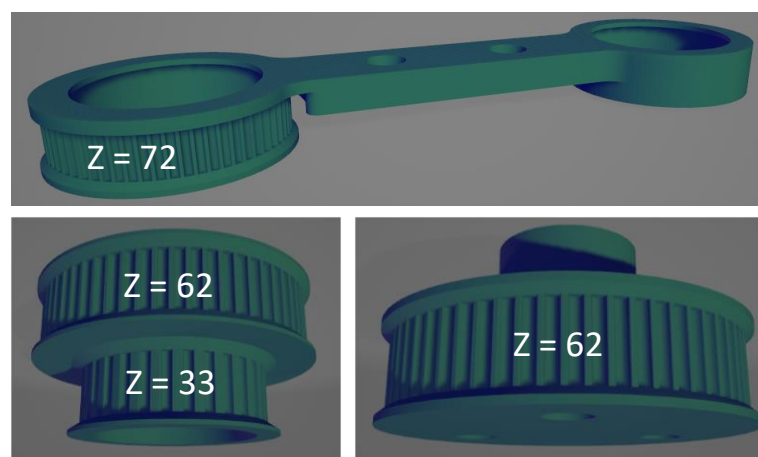


Рисунок 3.1 – Тривимірні моделі шківів

Для передачі руху з крокових двигунів використовуються зубчасті шківи з кількістю зубців  $Z = 16$ . Таким чином можна розрахувати передатні числа ремінної передачі для кожної ланки:

$$i_1 = \frac{72}{16} = 4,5$$

$$i_2 = \frac{62}{16} \cdot \frac{62}{33} = 7,28$$

де  $i_1, i_2$  – передатні числа для плеча та ліктя відповідно.

Обчислені значення надалі будуть використовуватися у програмному забезпеченні для визначення кількості кроків, які має виконати двигун, для приведення відповідної йому ланки до заданого положення.

На кінці другої ланки (ліктя) встановлюється присоска – елемент вакуумного захватного пристрою. На рисунку 3.2 наведено її тривимірну модель.

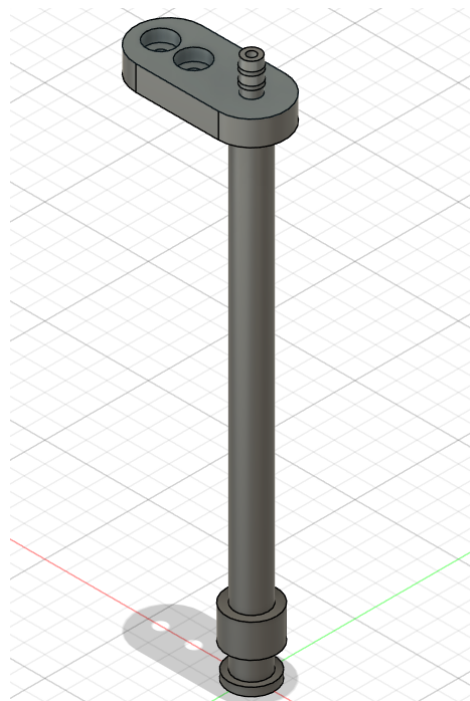
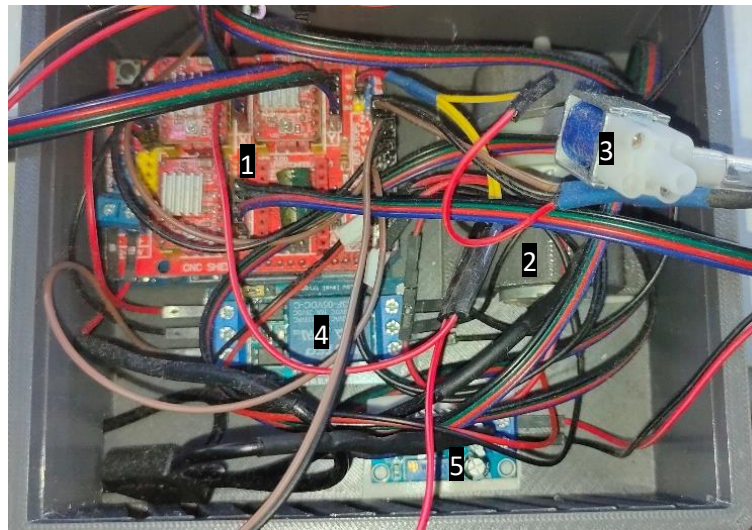


Рисунок 3.2 – 3D-модель присоски

Як видно з моделі, випускний отвір, до якого приєднується шланг, що сполучає присоску з вакуум-генератором і забезпечує розрідження, знаходиться

у верхній частині присоски. Така конфігурація його розміщення мінімізує ймовірність створення шлангом перешкод для руху маніпулятора та утримуваних ним об'єктів.

Електронні компоненти системи розміщуються окремо від механічної частини – у спеціальному корпусі, закріпленому до бази маніпулятора (рис. 3.3). Такий підхід дозволяє мінімізувати навантаження на рухомі вузли та сприяє компактності конструкції.



1 – плата керування; 2 – компресор; 3 – клапан; 4 – модуль реле; 5 – понижувальний перетворювач  
Рисунок 3.3 – Електронні компоненти системи

Основою макету є прямокутна платформа, на якій монтується сам маніпулятор. Робоча зона маніпулятора обмежена бортиком зі скошеним краєм під кутом  $60^\circ$ , на якому закріплюється світлодіодна стрічка. Вона створює стабільне периферійне освітлення робочої зони маніпулятора. Однак за такого підсвічування у центральній частині платформи виникає область недостатньої освітленості. Для усунення цього ефекту над платформою встановлюється поперечна горизонтальна перекладина, на якій закріплюється додаткова світлодіодна стрічка, що забезпечує рівномірний розподіл світла по всій площині. Окрім стрічки на перекладині монтується камера. Вона встановлюється у перпендикулярному до площини платформи положенні, таким чином, щоб її поле зору охоплювало весь макет.

Усі конструкційні елементи маніпулятора друкуються на 3D-принтері по заздалегідь створеним тривимірним моделям. Як приклад, на рисунку 3.4 представлено 3D-модель ліктьової ланки, що була створена в САПР Autodesk Fusion 360.

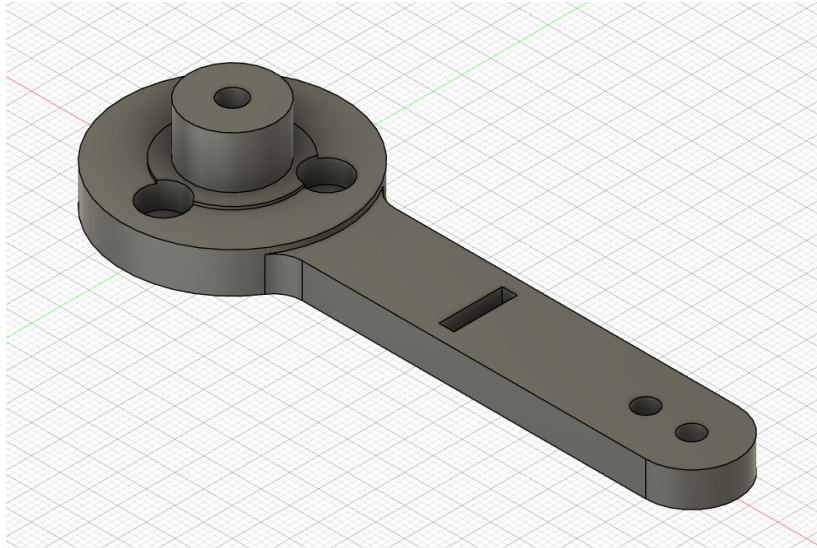


Рисунок 3.4 – 3D-модель ліктя

Після підбору та друку всіх необхідних механічних та конструкційних компонентів було виконано складання макету та монтаж електроніки. Зовнішній вигляд повністю зібраного макету представлено на рисунку 3.5.

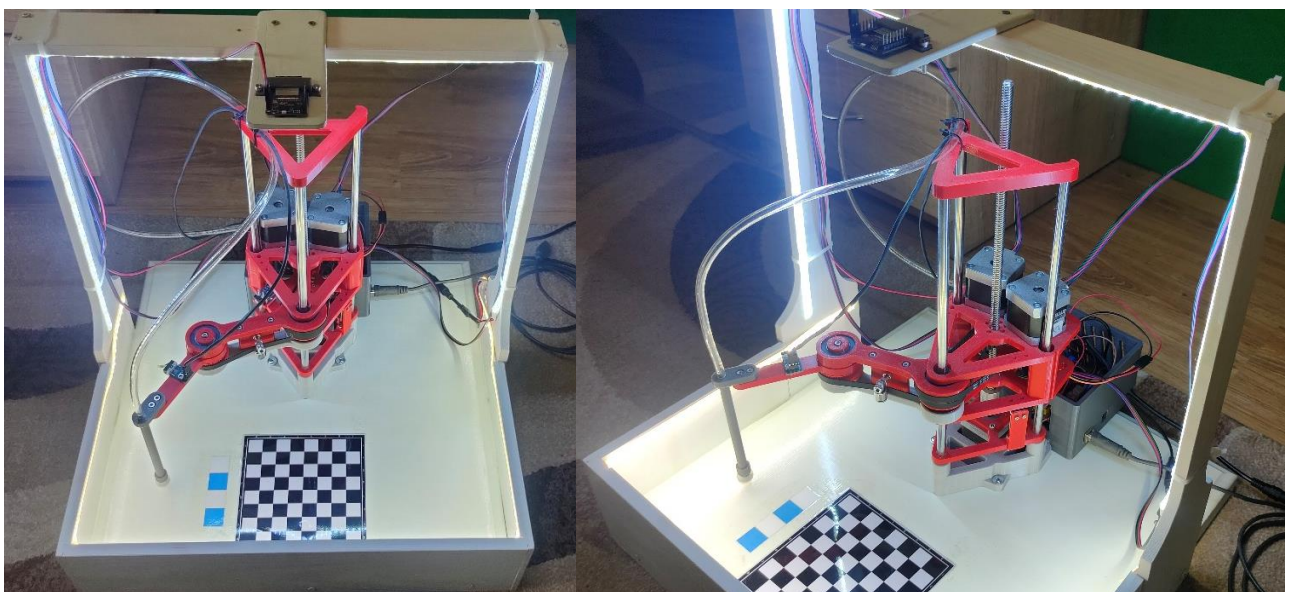


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд зібраного макету

### 3.2 Вибір мов програмування та засобів розробки

Одним із ключових підготовчих етапів розробки програмного забезпечення є обґрунтований вибір мов програмування та відповідних інструментальних засобів розробки.

Для прошивки мікроконтролера Arduino Uno було обрано мову програмування C++ та середовище розробки Arduino IDE. Такий вибір є типовим при роботі з платами Arduino, оскільки він поєднує високу продуктивність виконуваного коду зі зручністю розробки, що істотно полегшує реалізацію керування апаратними компонентами.

З метою спрощення розробки алгоритмів керування кроковими двигунами було обрано використання бібліотеки AccelStepper, яка є розширеною альтернативою стандартної бібліотеки Stepper. AccelStepper на відміну від Stepper, підтримує прискорення, без якого неможливо плавно та точно керувати приводами маніпулятора. Окрім цього, бібліотека забезпечує асинхронне керування кількома двигунами одночасно, що суттєво спрощує реалізацію складних траєкторій руху.

Інструментом реалізації керуючого програмного забезпечення було обрано мову програмування Python. Такий вибір обумовлений її лаконічним синтаксисом та високою ефективністю у вирішенні задач, пов'язаних із комп'ютерним зором, завдяки існуванню OpenCV – бібліотеки, яка надає широкий набір інструментів для роботи з цифровими зображеннями, зокрема для виконання операцій фільтрації, сегментації, розпізнавання об'єктів тощо.

Для розробки графічного інтерфейсу користувача було обрано використання технології QML, яка є складовою частиною фреймворку Qt. QML поєднує декларативний підхід до опису інтерфейсу з можливістю інтеграції бізнес-логіки через Python, що забезпечує чітке розділення візуальної та функціональної складової програми. Це дозволяє швидко змінювати зовнішній вигляд інтерфейсу, не змінюючи логіку роботи програми, що покращує підтримку та масштабованість проєкту.

### 3.3 Опис алгоритмів комп'ютерного зору

Алгоритм комп'ютерного зору являє собою послідовність операцій, спрямованих на перетворення вхідного зображення робочої зони маніпулятора у структуроване подання його поточного стану.

З метою ілюстрації ключових етапів, притаманних алгоритмам комп'ютерного зору, що застосовуються при сортуванні, а також методів, що забезпечують їх реалізацію, у межах розроблюваного макета передбачено сценарій, за якого маніпулятор здійснює переміщення шашкових фігур. Розпізнавання об'єктів у цьому випадку ґрунтується на аналізі їх форми, кольору, текстури та просторового розташування. Таким чином запропонований макет дозволить наочно продемонструвати підходи до розв'язання типових задач, з якими стикаються розробники систем комп'ютерного зору в умовах реального виробництва.

На початку роботи алгоритму вхідні дані у форматі байтового масиву декодуються у кольорове зображення:

```
image = cv2.imdecode(np.asarray(bytearray(image), dtype=np.uint8),
cv2.IMREAD_COLOR)
```

З отриманого зображення шляхом фіксованого кадрування виділяється область, що відповідає розташуванню шашкової дошки:

```
board = image[205:660, 573:1023]
```

Подальша обробка передбачає перетворення зображення дошки у відтінки сірого для спрощення аналізу:

```
gray = cv2.cvtColor(board_image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
```

Для покращення локального контрасту застосовується метод адаптивного вирівнювання гістограми (CLAHE), після чого використовується медіанний фільтр для зменшення впливу шумів:

```
clahe = cv2.createCLAHE(clipLimit=3.0, tileGridSize=(8, 8))
image = clahe.apply(gray)
image = cv2.medianBlur(image, 7)
```

Виявлення фігур виконується за допомогою трансформації Хаффа для кіл (Hough Circle Transform), що дозволяє визначити координати і радіуси круглих об'єктів на зображенні:

```
pieces = cv2.HoughCircles(image, cv2.HOUGH_GRADIENT, 1.6, 30, param1=80,
param2=23, minRadius=30, maxRadius=35)
```

Кожна знайдена фігура виділяється із зображення шляхом формування бінарної маски у формі кола:

```
for x, y, r in pieces[0, :]:
    x1, y1 = max(0, int(x - r)), max(0, int(y - r))
    x2, y2 = min(w, int(x + r)), min(h, int(y + r))
    piece_image = board_image[y1:y2, x1:x2]
    piece_mask = np.zeros(piece_image.shape[:2], dtype=np.uint8)
    cv2.circle(piece_mask, (r, r), r, 255, thickness=-1)
    piece_image = cv2.bitwise_and(piece_image, piece_image, mask=piece_mask)
```

Для класифікації кольору фігури здійснюється перетворення зображення у колірний простір HSV та обчислюється гистограма відтінків. На основі інтегральних характеристик гистограми у визначених діапазонах здійснюється вибір між кольорами.

```
piece_image = cv2.cvtColor(piece_image, cv2.COLOR_BGR2HSV)

hist = cv2.calcHist([piece_image], [0], None, [180], [0, 180])
orange_hist_range = np.sum(hist[10:25])
green_hist_range = np.sum(hist[35:85])

if orange_hist_range > green_hist_range:
    return "orange"
elif green_hist_range > orange_hist_range:
    return "green"
else:
    return None
```

Визначення позиції фігури на ігровому полі здійснюється через бінарний пошук відповідної клітинки на дошці за координатами центра фігури. Для кожної фігури додатково визначається статус «дамки» шляхом порівняння характерних ознак (ключових точок) на основі алгоритму SIFT з відповідними еталонними зображеннями дамок обох кольорів. Пошук відповідностей здійснюється за допомогою швидкого алгоритму FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors).

```

sift = cv2.SIFT_create()
# FLANN parameters
FLANN_INDEX_KDTREE = 1
index_params = dict(algorithm=FLANN_INDEX_KDTREE, trees=5)
search_params = dict(checks=50)
flann = cv2.FlannBasedMatcher(index_params, search_params)

kp1, des1 = sift.detectAndCompute(piece_image, None)

kp2, des2 = sift.detectAndCompute(self.green_king_image, None)
green_king_matches = flann.knnMatch(des1, des2, k=2)

kp3, des3 = sift.detectAndCompute(self.orange_king_image, None)
orange_king_matches = flann.knnMatch(des1, des3, k=2)

matches = len(green_king_matches) > 13 or len(orange_king_matches) > 13

```

Для підвищення стійкості розпізнавання реалізовано механізм накопичення інформації з декількох кадрів. Протягом заданої кількості кадрів відбувається збереження результатів, після чого визначається найчастіше спостережуваний тип об'єкта за допомогою моди та обчислюються усереднені значення координат і радіусів.

```

if self._layer >= self._layers:
    self._layer = 0
    board[:, :, 0] = mode(self._boards[:, :, :, 0], axis=0).mode
    board[:, :, 1:] = np.mean(self._boards[:, :, :, 1:], axis=0)
    self.board_ready.emit(board)
else:
    self._boards[self._layer, :, :] = board
    self._layer += 1

```

Результатом роботи алгоритму є дві форми вихідних даних: масив, що містить інформацію про стан кожної клітинки дошки (тип фігури, координати центра та радіус), та зображення дошки. Вихідні дані передаються через відповідні сигнали для подальшої обробки та відображення:

```

self.image_ready.emit(np.ascontiguousarray(board_image))
self.board_ready.emit(board)

```

Запропонований алгоритм демонструє поєднання класичних методів комп'ютерного зору для розпізнавання та класифікації об'єктів. Завдяки точному визначенню типу та розташування фігур, він є придатним для реалізації задач сортування за формальними ознаками у системах автоматизованого сортування. Повний текст розробленого алгоритму наведено в Додатку Б.

### 3.4 Розробка програмного забезпечення для мікроконтролера

У межах цього етапу було реалізовано програмне забезпечення для мікроконтролера Arduino Uno. Функція цього програмного модуля полягає в інтерпретації команд, що надходять з блоку керування вищого рівня, та виконанні відповідних дій маніпулятором у реальному часі.

Уся логіка взаємодії з мікроконтролером організована навколо класів Robot і Action. Клас Robot інкапсулює низькорівневі операції керування виконавчими механізмами, серед яких переміщення кінцівки маніпулятора, захоплення об'єктів, повернення у вихідне положення та часова затримка.

Передбачена система обробки команд заснована на структурі Action, яка визначає тип операції та відповідні аргументи. Команди надходять через послідовний порт у текстовому форматі та передаються функції-аналізатору. При успішному розпізнаванні команда виконується відповідним методом класу Robot, а результат її виконання надсилається назад через послідовний порт для підтвердження.

Основною задачею, яка покладається на ПЗ контролера маніпулятора, є перетворення декартових координат ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), що надходять йому з блоку керування вищого рівня, на переміщення кінцівки маніпулятора у відповідне положення. Ця задача включає вирішення оберненої задачі кінематики маніпулятора (ОЗК).

ОЗК передбачає визначення кутів повороту ланок маніпулятора, необхідних для досягнення заданого положення та орієнтації виконавчого органу в декартовій системі координат. На сьогоднішній день існує багато підходів до її розв'язання, включаючи чисельні методи, методи штучного інтелекту, а також аналітичні методи. Однією з переваг SCARA-маніпулятора є можливість легкого вирішення ОЗК за допомогою простого тригонометричного підходу, який дозволяє аналітично вивести рішення, що спрощує програмування та водночас забезпечує високу точність та ефективність обчислень.

### 3.5 Розробка інтерфейсу користувача

Перед початком розробки інтерфейсу користувача було висунуто ряд функціональних та нефункціональних вимог, які він має задовольняти.

Функціональні вимоги:

- забезпечення візуального контролю стану робочої зони маніпулятора шляхом відображення відеопотоку з камери разом з графічними позначеннями розпізнаних об'єктів;

- можливість інтерактивного обміну даними з контролером маніпулятора через текстовий термінал для негайної відправки команд та отримання відповідей;

- можливість динамічного вибору послідовного порту, до якого підключено маніпулятор;

- ведення журналу помилок;

- забезпечення негайної зупинки процесу в разі виникнення критичної ситуації та сповіщення оператора про настання такої події;

Нефункціональні вимоги:

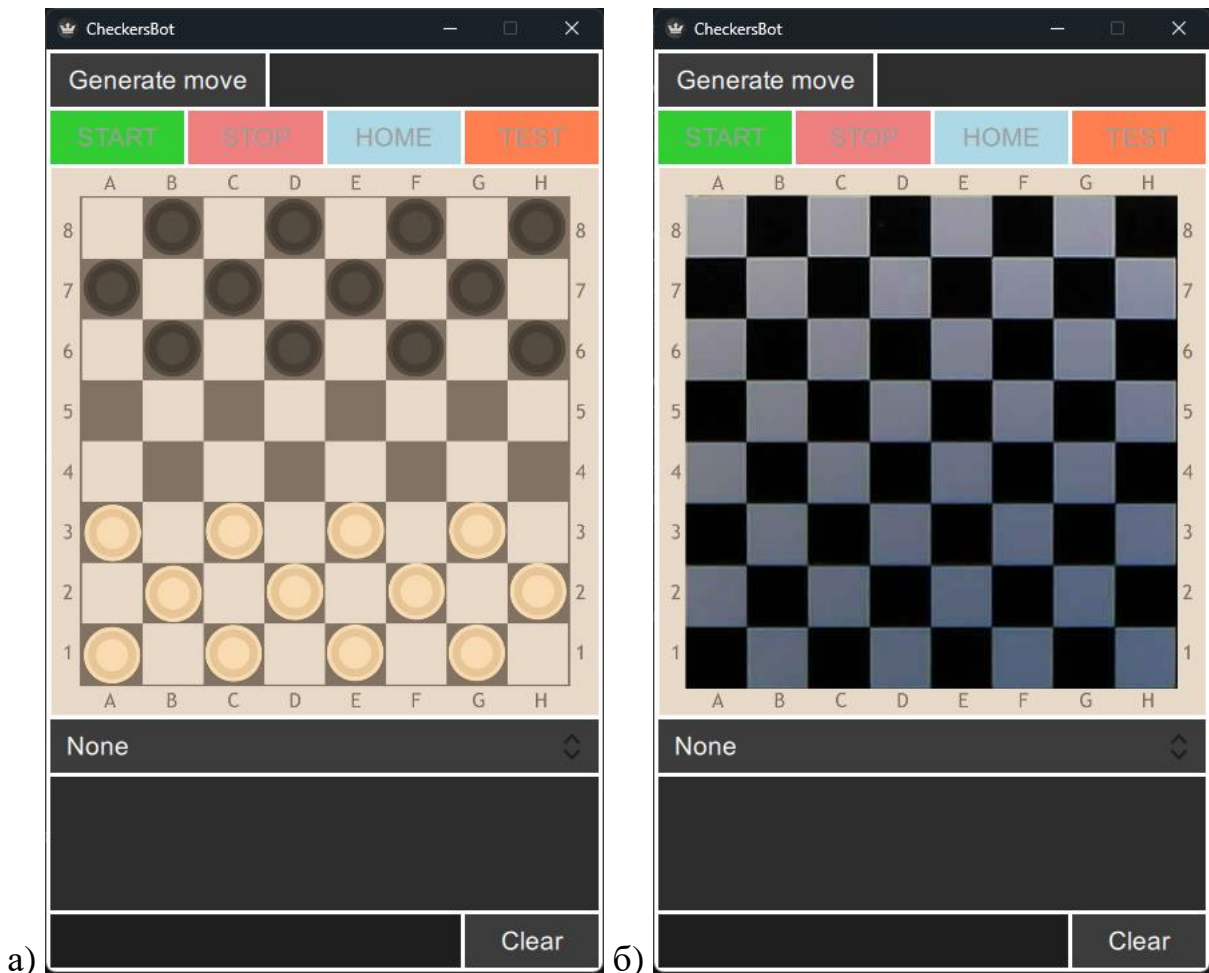
- наявність «кнопок швидкого доступу» для виконання найважливіших операцій, таких як запуск та зупинка процесу, приведення маніпулятора до вихідного положення, а також запуск тестового калібрувального сценарію;

- підтримка «історії» переданих маніпулятору команд для забезпечення їх швидкої повторної відправки шляхом простого перемикання;

- зручність використання;

- естетична привабливість.

Після визначення вимог було розроблено інтерфейс користувача, зовнішній вигляд якого представлено на рис. 3.6.



а – камера вимкнена; б – камера увімкнена

Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд графічного інтерфейсу користувача

Розроблений інтерфейс враховує всі вищезазначені вимоги та складається з наступних компонентів.

У нижній частині вікна розташовано монітор послідовного порту. Він складається з випадаючого списку, що містить перелік послідовних портів, доступних для підключення в даний момент, багаторядкового текстового поля, призначеного для відображення вхідних та вихідних даних з порту, однорядкового текстового поля для введення команд та кнопки очищення вмісту монітору.

Випадаючий список з переліком послідовних портів періодично оновлюється для відстеження появи нових або зникнення існуючих пристроїв. У разі вибору деякого порту зі списку програма автоматично здійснює спробу

з'єднатися з ним. У випадку невдачі вона повертається до вихідного стану (підключення відсутнє) та очікує наступних спроб.

Багаторядкове текстове поле являє собою монітор, який призначений для відображення усіх вхідних та вихідних даних, якими обмінюються пристрої.

Однорядкове текстове поле слугує для введення команд від оператора. Воно є активним лише тоді, коли з пристроєм встановлено з'єднання та виконано його приведення у вихідне положення. При натисканні клавіші Enter введена команда відправляється в порт та текстове поле очищується для введення наступної команди. Обмін повідомленнями відбувається асинхронно, що запобігає блокуванню інтерфейсу користувача.

Відповідно до встановлених вимог монітор порту підтримує історію команд, відправлених у порт. Перемикання між командами відбувається за допомогою клавіш «ВГОРУ» та «ВНИЗ».

У середній частині вікна оператор може спостерігати за станом робочої зони маніпулятора. Тут візуалізується відеопотік, отриманий з камери, разом з графічною інформацією, що відображає атрибути об'єктів, розпізнаних алгоритмом комп'ютерного зору. Ця частина інтерфейсу є дуже важливою, оскільки саме вона надає оперативну інформацію про хід виконання процесу в режимі реального часу, що дозволяє оператору негайно реагувати на непередбачені ситуації.

Над зоною візуалізації розташовано «панель швидкого доступу», яка містить кнопки, що дозволяють оператору швидко запускати виконання певних дій без необхідності ручного введення команд. Це такі дії як запуск процесу, його термінова зупинка, приведення маніпулятора до вихідного положення, а також запуск тестового калібрувального сценарію. З метою підвищення безпеки ці кнопки є неактивними в разі відсутності підключення до послідовного порту. Кнопки «СТАРТ» та «ТЕСТ» мають підвищений рівень захисту: вони стають активними лише після приведення маніпулятора у вихідне положення.

У верхній частині вікна оператор може задавати послідовність дій, які має виконати маніпулятор, у вигляді текстового рядку в спеціальній нотації.

### 3.6 Тестування та експериментальні дослідження

На завершальному етапі розробки макету було виконано калібрування маніпулятора та налаштування параметрів алгоритму машинного зору. Метою цього етапу було забезпечення узгодженості між інформацією, отриманою із системи машинного зору, та фізичними діями маніпулятора, який виконує операції у межах свого робочого простору.

Калібрування маніпулятора полягало у визначенні відповідності між координатами, що генеруються алгоритмом комп'ютерного зору, та реальною геометрією його робочої зони. З цією метою використовувались еталонні положення фігур. У результаті калібрування вдалося мінімізувати похибку при позиціонуванні захвату.

Налаштування алгоритму комп'ютерного зору здійснювалось на основі результатів серії експериментальних досліджень із різними конфігураціями розташування фігур та умовами зовнішнього освітлення. Після експериментального підбору параметрів було виконано тестування алгоритму. На рисунку 3.7 показано приклад роботи алгоритму розпізнавання фігур.

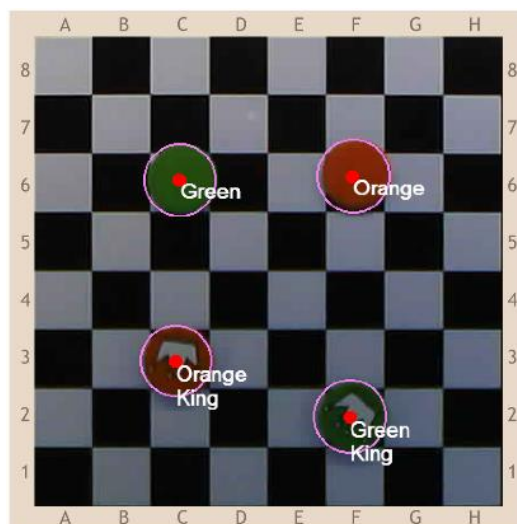


Рисунок 3.7 – Приклад роботи алгоритму розпізнавання фігур

На рисунку 3.8 наведено приклад розпізнавання великої кількості фігур на одному кадрі.

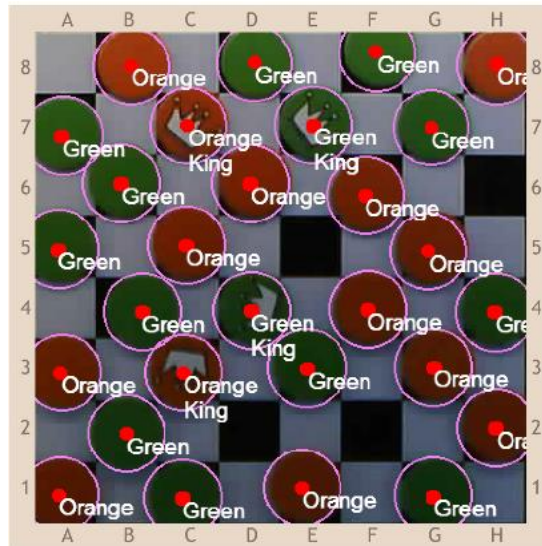


Рисунок 3.8 – Розпізнавання великої кількості фігур

Як можна переконатися з рисунків 3.7-3.8 розроблений алгоритм стабільно визначає всі можливі стани фігур та є інваріантним відносно повороту фігури. Слід також зазначити, що завдяки наявній системі ілюмінації вдалося досягти високої повторюваності результатів за різних умов зовнішнього освітлення. До прикладу на рисунку 3.9 представлено результат роботи алгоритму в темряві (за відсутності жодних зовнішніх джерел світла).

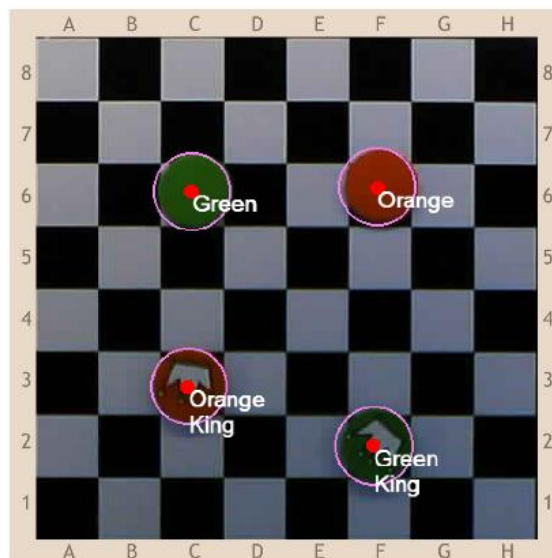


Рисунок 3.9 – Результат роботи алгоритму за поганого освітлення

Наступним кроком було проведено інтеграційне тестування розробленої системи в цілому. У результаті проведеного тестування було з'ясовано, що кінематика SCARA забезпечує більш швидке виконання операцій типу «pick-and-place» порівняно з декартовими та ангулярними варіантами, що є ключовим чинником підвищення продуктивності процесу сортування. Поряд з цим було визначено, що пневматичний захват забезпечує міцне та надійне утримання деталей, різних за формою, розмірами та матеріалом, що підвищує універсальність системи та дозволяє використовувати її в широкому спектрі застосувань. Проведене імітаційне моделювання ПДД-регулятора для керування захватом показало, що його застосування в реальній системі здатне значно підвищити її надійність та енергоефективність, оскільки захват зможе адаптивно змінювати зусилля в залежності від характеристик захоплюваних об'єктів. Також це додатково сприятиме зменшенню кількості шумів та вібрацій, що генерує компресор під час створення вакууму.

У результаті виконання частини роботи, пов'язаної з проектуванням ЗП, було визначено доцільним проведення подальших розробок у напрямку підвищення ефективності пневматичного захоплення шляхом збереження вакууму за рахунок використання запірних клапанів та більш складних алгоритмів керування.

Тестування алгоритму машинного зору продемонструвало його високу точність та повторюваність. Такий результат гарантує стабільність сортування за різних зовнішніх умов, що дозволяє легко впроваджувати розроблену систему в будь-яке виробниче середовище.

Таким чином, на основі отриманих результатів, можна стверджувати, що автоматизація процесу сортування деталей із застосуванням SCARA-маніпулятора, пневматичного захвату та технологій комп'ютерного зору дозволяє покращити показники продуктивності та ефективності процесу сортування на виробництві. Це дозволяє рекомендувати систему до впровадження на виробничих лініях підприємств або у навчальний процес задля поглиблення знань у галузі робототехніки, кінематики, програмування тощо.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз небезпек і шкідливих факторів

Основну частину робочого часу оператор автоматизованої системи проводить за персональним комп'ютером, у зв'язку з чим особливої уваги потребують небезпечні та шкідливі чинники, що можуть існувати на його робочому місці. До них належать підвищений рівень шуму, несприятливий мікроклімат, недостатнє освітлення, підвищений рівень радіочастотного випромінювання, висока напруга електромережі, статична електрика та інші. Робота з ПК також супроводжується значним психоемоційним навантаженням, що пов'язане з постійним моніторингом функціонування системи, аналізом інформації та прийняттям рішень у реальному часі. При регулярному впливі виробничих факторів, що не відповідають нормативам, збільшується рівень професійно обумовлених захворювань працівників та можливий розвиток професійних хвороб органів зору, опорно-рухового апарату та нервової системи. Відтак, дотримання вимог охорони праці та усунення шкідливих факторів є необхідною умовою для збереження здоров'я оператора та забезпечення безпечної експлуатації автоматизованої системи [32].

### 4.2 Заходи з охорони праці

Для створення безпечних умов праці на робочому місці оператора необхідно здійснити низку заходів організаційного, технічного та санітарно-гігієнічного характеру. Насамперед слід провести інструктаж з охорони праці, у якому ознайомити працівника з потенційними ризиками, правилами безпечної експлуатації обладнання, порядком дій у випадку аварійних ситуацій, а також надати йому доступ до актуальних інструкцій і технічної документації [32].

Робоче місце оператора повинно бути організовано згідно з ергономічними принципами та відповідними стандартами:

- розміщення елементів робочого місця не має заважати рухам та переміщенню оператора для роботи з ПК;
- монітор має бути встановлений так, щоб відстань від поверхні екрана до очей оператора була 600-700 мм залежно від розміру екрана;
- клавіатура має розміщуватися на робочому або окремому столі на відстані 100-300 мм від краю з боку користувача;
- конструкція робочого столу має бути такою, щоб оптимально розмістити на робочій поверхні використовуване обладнання;
- крісло має забезпечувати підтримування раціональної робочої пози під час виконання основних виробничих операцій та можливість зміни пози;
- освітлення повинно бути м'яким, рівномірним, без відблисків на моніторі.

Санітарно-гігієнічні умови включають підтримання оптимального мікроклімату – температури в межах 20-24°C, відносної вологості 40-60 %, а також ефективної вентиляції робочого приміщення. У разі використання обладнання, що створює підвищений шумовий фон, доцільне застосування звукопоглинальних матеріалів або додаткових елементів шумоізоляції.

Також до важливих заходів належить регулярне технічне обслуговування обладнання, проведення періодичних оглядів і діагностики вузлів, які потенційно є джерелами підвищеної небезпеки, а також ведення відповідної технічної документації. Особливу увагу слід приділити безпеці рухомих частин маніпулятора, які мають бути ізольовані від випадкового контакту з працівником захисними огороженнями.

У зв'язку з потенційною загрозою пожеж у зонах, де розташовано електричне та електронне устаткування, є потреба у впровадженні автоматичних систем пожежогасіння та сигналізації. Також слід гарантувати наявність вогнегасників поблизу від обладнання та організувати регулярні тренінги для персоналу щодо дій у разі займання [32].

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було розроблено макет системи автоматизованого сортування на базі SCARA-маніпулятора з використанням технологій комп'ютерного зору, а також проведено експериментальне дослідження розробленого макету. У ході виконання роботи були виконані наступні завдання:

- проведено аналіз існуючих конструкцій та технологій для роботизованого сортування, зокрема розглянуто кінематики маніпуляторів та технології комп'ютерного зору, що застосовуються в сучасних сортувальних системах;

- здійснено вибір кінематики для майбутньої системи автоматизації;
- розроблено архітектуру та структурну схему системи;
- підібрано та обґрунтовано необхідні апаратні компоненти;
- створено програму керування маніпулятором;
- розроблено алгоритм розпізнавання деталей у вигляді шашкових фігур;
- розроблено графічний інтерфейс користувача для забезпечення зручної взаємодії оператора з автоматизованою системою;

- складено фізичний макет системи;
- проведено тестування макету в різних умовах.

Проведення експериментальних досліджень дозволило перевірити працездатність розробленої системи. У ході випробувань було встановлено, що розроблений алгоритм комп'ютерного зору здатний ефективно розпізнавати об'єкти незалежно від їхньої просторової орієнтації та умов зовнішнього освітлення, без потреби додаткового ручного коригування параметрів. Отримані в роботі результати свідчать про потенційну придатність запропонованої системи для подальшого впровадження у виробниче середовище або навчальний процес для студентів та учнів задля поглиблення знань у галузі робототехніки, кінематики, програмування тощо.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП «УкрНДНЦ». 2016. 30 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В. Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.
3. Автоматизований завод. Промислові роботи на виробництві [Електронний ресурс]. – URL: <https://surl.li/ztlqla>
4. Конспект лекцій з курсу «Автоматизація виробничих процесів» для студентів спеціальності 181 «Харчові технології» / В.Б.Савків, Р.І.Михайлишин, І.Р.Козбур. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – 89 с.
5. Промислові роботи [Електронний ресурс]. – URL: <https://kaf-av.tntu.edu.ua/index.php/mn-abiturient/mn-articles/676-art-industrial-robots>
6. Навчальний посібник з дисципліни «Маніпулятори та промислові роботи»: для студентів бакалаврів / Уклад. Є. П. Михайлов, В. М. Лінгур ; Нац. ун-т «Одеська політехніка». – Одеса, 2024. – 233 с.
7. Huashan Liu. An Efficient Inverse Kinematic Algorithm for a PUMA560-Structured Robot Manipulator / Huashan Liu, Wuneng Zhou, Xiaobo Lai and Shiqiang Zhu // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10. – P.1–5.
8. Automation technology and technical education solutions | Festo CH [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.festo.com/ch/en/>
9. Лучанінова О.Ю. РОБОТ-МАНІПУЛЯТОР З М'ЯКИМ ЗАХОПЛЕННЯМ [Електронний ресурс]. – URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/0007c8e0-7430-43e7-8027-4a46737dd942/content>

10. M-1000iA. fanucamerica [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/m-1000-series/m-1000ia>
11. Цвіркун Л.І. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с
12. Yaskawa motoman MPP3H delta robot | reprobots [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.reprobots.com/product-page/yaskawa-motoman-mpp3h-delta-robot>
13. Голубенко, І. М. Особливості роботи дельта-роботів / І. М. Голубенко, С. Л. Лакоза // XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 15-16 травня 2019 р., м. Київ, Україна : збірник праць / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 20–23.
14. UR12e Medium sized versatility. Collaborative robotic automation | Universal Robots Cobots [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.universal-robots.com/products/ur12e/>
15. Колаборативні роботи [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.qweedo-robotics.com/robots/>
16. Claudio U. Design, construction and control of a SCARA manipulator with 6 degrees of freedom [Електронний ресурс]. – URL: <https://doi.org/10.22201/icat.16656423.2016.14.6.14>
17. SCARA Robots | #1 Manufacturer Worldwide | Epson US. Epson Global Portal [Електронний ресурс]. – URL: <https://epson.com/scara-robots>
18. Omarov, M., Korobskiy, V., & Nevliudova, V. (2023). Features of kinematics and control of multi-link manipulator robots. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 1(71), 127-133.
19. Застосування Scara Robots: Scara Robot дуже підходить для якого типу операцій? [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.evsint.com/uk/scara-robots-applications-scara-robot-is-very-suitable-in-which-kind-of-operation/>

20. Що таке комп'ютерний зір (Computer Vision, CV)? [Електронний ресурс]. – URL: <https://thetransmitted.com/adlucem/shho-take-kompyuternyj-zir-computer-vision-cv/>

21. Types, Applications and Functions of Machine Vision Systems [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.iqsdirectory.com/articles/machine-vision-system.html>

22. Комп'ютерний зір (Computer Vision) [Електронний ресурс]. – URL: <https://blog.avislab.com/cv/>

23. Sukop, M., Hajduk, M., Baláž, V., Semjon, J., & Vagaš, M. (2011). Increasing Degree of Automation of Production Systems Based on Intelligent Manipulation. *Acta Mechanica Slovaca*, 15(4), 58–63. <https://doi.org/10.21496/ams.2011.041>

24. Технології комп'ютерного зору [Електронний ресурс]. – URL: <https://metinvest.digital/ua/page/1028>

25. Li, J., Chen, Y., Li, W., & Gu, J. (2022). Balanced-YOLOv3: Addressing the Imbalance Problem of Object Detection in PCB Assembly Scene. *Electronics*, 11(8), 1183. <https://doi.org/10.3390/electronics11081183>

26. Комп'ютерний зір [Електронний ресурс]. – URL: <https://ifarming.ua/monitoring/komp-yuternyj-zir-osnova-agronomiyi-nastupnogo-pokolinnya>

27. Zhang, Q., Tian, W., Hu, J., Li, P., Wu, C. (2021). Robot Hand-Eye Calibration Method Based on Intermediate Measurement System. In: Liu, XJ., Nie, Z., Yu, J., Xie, F., Song, R. (eds) *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2021. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 13015. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89134-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89134-3_4)

28. Машинний зір для автоматизації складу [Електронний ресурс]. – URL: <https://forstor.ua/ua/c-mashinnoe-zrenie-376/>

29. Instructables. How to control vacuum pump air pump suction for robotic arm. *Instructables* [Електронний ресурс]. –

URL: <https://www.instructables.com/How-to-Control-Vacuum-Pump-Air-Pump-Suction-for-Ro/>

30. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів. Тернопіль : Терноп. держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя, 2008. 232 с.

31. Kadpan, W. R., Mustafa, F. F., Kadhim, H. T., & Igor Nikolaevich. (2024). Optimizing the Performance of DC Electric Smart Gate Motor using Ziegler Nichols Tuning Methods. *Journal of Engineering*, 30(12), 1-15. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.12.01>

32. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.