

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»
(повне найменування вищого навчального закладу)

ІНЖЕНЕРНО - ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
«___» _____ 20__ р

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо - професійною програмою «Технічні та програмні засоби
автоматизації»

з спеціальності 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему: Синтез системи керування роботом-маніпулятором у задачах сортування
та переміщення об'єктів

Виконав: студент 4 курсу, групи ЛА-12
(шифр групи)

Бугай Дмитро Ігорович
(прізвище, ім'я, по-батькові)

_____ (підпис)

Керівник ст. викладач, доктор філософії Коротинський А.П.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант Охорона праці ктн., ст. вик. Ковтун А. І.
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____ ктн., доц. Гайдай С. С.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що в цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань
Студент _____
(підпис)

Київ - 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва)

Освітньо - професійна програма «Технічні та програмні засоби
автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віталій ЦАПАР
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Бугай Дмитро Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Синтез системи керування роботом-маніпулятором у задачах сортування та переміщення об'єктів,

керівник проекту Коротинський А. П., ст. викладач, доктор філософії,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «20» травня 2025р. №1653-с

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту Технічні характеристики за паспортними даними використовуваних компонентів. Кут повороту серводвигунів $0...180^\circ$, робочу напругу $4.8...7.2\text{ В}$, крутний момент $10...13\text{ кг}\cdot\text{см}$ і швидкість обертання $0.13...0.17\text{ с}/60^\circ$

4. Зміст пояснювальної записки вибір типу маніпулятора, кінематичної структури та кінцевого ефектора. Побудова математичної моделі серводвигунів та маніпулятора. Синтез та моделювання системи керування роботом маніпулятором. Реалізація

автоматичного визначення координат об'єкта на основі машинного зору. Розробка програмної реалізації автоматичного керування маніпулятором.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) схема автоматизації процесу сортування та переміщення об'єктів, принципова електрична схема.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Ковтун А. І., старший викладач, к.т.н.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вибір типу маніпулятора, кінематичної структури та кінцевого ефектора	21.04.2025	
2	Побудова математичної моделі серводвигунів та маніпулятора	28.04.2025	
3	Синтез та моделювання системи керування роботом маніпулятором	12.05.2025	
4	Реалізація автоматичного визначення координат об'єкта на основі машинного зору	19.05.2025	
5	Реалізація автоматичного визначення координат об'єкта на основі машинного зору	26.06.2025	
6	Охорона праці	01.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Дмитро БУГАЙ

Керівник проекту _____
(підпис)

Антон КОРОТИНСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт включає пояснювальну записку обсягом XX сторінок, XX додатків, 67 ілюстрацій та 39 літературних джерел.

У роботі здійснено розробку автоматичної системи керування роботом маніпулятором для переміщення та сортування об'єктів на основі візуального аналізу. Наведено математичне обґрунтування структури системи, виконано побудову та моделювання її роботи в середовищі MATLAB/Simulink. Створено електричні схеми підключення виконавчих елементів, розроблено функціональну схему автоматизації, а також програмний інтерфейс для ручного керування через сенсорний дисплей.

Ключові слова: робот-маніпулятор, сервомотор, програмне забезпечення, математична модель, машинний зір.

ABSTRACT

The bachelor's degree thesis includes a project report consisting of XX pages, XX appendices, 68 illustrations, and 39 bibliographic references.

This work presents the development of an automatic control system for a robotic manipulator designed to sort and transfer objects based on visual analysis. The mathematical structure of the system is substantiated, and its operation is modeled using MATLAB/Simulink. Electrical connection diagrams for the actuators have been designed, a functional automation scheme has been developed, and a graphical user interface for manual control via a touch display has been implemented.

Key words: robotic manipulator, servomotor, software, mathematical model, machine vision.

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів

- 1) SCARA - selective compliance assembly robot arm.
- 2) EOM - електронно-обчислювальна машина.
- 3) ПЛК - програмований логічний контролер.
- 4) АСК - автоматична система керування.
- 5) ЗЗК - зворотня задача кінематики.
- 6) RC (servo) - radio control.
- 7) ШІМ (PWM) - широтно-імпульсна модуляція.
- 8) Duty Cycle - прогальність сигналу.
- 9) ПЗК - пряма задача кінематики.
- 10) ROI - region of interest.
- 11) eDP - embedded DisplayPort.
- 12) HDMI - high-definition multimedia interface.
- 13) USB - universal serial bus.
- 14) COM (контакт реле) – common.
- 15) NO (контакт реле) - normally open.
- 16) NC (контакт реле) - normally closed.
- 17) GND (в проводах) - ground

Зміст

ВСТУП.....	2
Розділ 1. Опис предметної області.....	3
1.1. Порівняльний аналіз типів маніпуляторів.....	3
1.2. Огляд сучасних рішень на ринку	7
1.3. Взаємодія з операторами.....	11
1.4. Вибір типу кінематичної конструкції та кінцевого ефектора.....	12
1.5. Архітектури систем автоматизації.....	15
Розділ 2. Моделювання об'єкта	17
2.1. Опис експериментальної установки.....	17
2.1.1. Опис серводвигунів.....	18
2.2. Структурно-параметрична схема об'єкта керування.....	20
2.3. Моделювання серводвигунів	22
2.3.1. Моделювання звичайного серводвигуна.....	22
2.3.2. Моделювання серводвигуна неперервного обертання	26
2.4. Вирішення задачі кінематики	28
2.5. Моделювання маніпулятора	30
Розділ 3. Машинний зір.....	35
3.1. Визначення робочої зони	35
3.2. Корекція перспективи	38
3.3. Класифікація об'єктів за кольором	39
Розділ 4. Синтез системи керування	41
4.1. Автоматичне визначення завдання	41
4.2. Зворотна задача кінематики.....	44
4.3. Синтез системи	45
4.4. Ручне керування.....	48
Розділ 5. Розробка схем автоматизації процесу.....	52
5.1. Розробка функціональної схеми керування	53
5.2. Розробка принципової електричної схеми	55
Розділ 6. Охорона праці	58
ВИСНОВКИ	64
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	65

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розроб.		Бугай Д. І.			Синтез системи керування роботом-маніпулятором у задачах сортування та переміщення об'єктів	Літ.	Арк.	Аркушів
Перев.		Коротинський А.П.					1	
						НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ІХФ, ЛА-12		
Н. контр.								
Затв.		Коротинський А.П.						

ВСТУП

Активний розвиток Індустрії 5.0 створює потребу в імплементації рішень заснованих на технології штучного інтелекту, для покращення робототехнічних ланок в системах автоматичного керування. До робототехнічних систем часто відносяться роботи маніпулятори, які залежно від конструкції та типу ефектора можуть мати багато застосувань в різних сферах. До основних задач роботів-маніпуляторів відноситься переміщення об'єктів, а аналіз авторами [1] зазначає, що ринок “material handling” роботів зазнає значного зростання в періоді з 2024 по 2031 роки. Перевагами використання таких рішень є мінімізація людської похибки та забезпечення безпеки працівників. Окрім того, маніпулятори класифікуються на різні типи залежно від кількості ступенів свободи, типів руху ланок та їх робочої області, що робить їх придатними також до виконання небезпечної для людини роботи. Кожна задача може вимагати різні типи маніпуляторів та ефєкторів, що ускладнює можливість використання однотипного маніпулятора для систем різного роду завдань.

Авторами [2] досліджено, що працівники металургійної промисловості щодня зустрічають різні ризики на роботі, а статистика показує, що в цій промисловості більше виробничих травм і захворювань, ніж у всій приватній промисловості. Працівники працюють з мастильно-охолоджувальними рідинами, випаровуваннями шкідливих газів та іншими матеріалами, які можуть спричинювати низку шкірних та респіраторних захворювань. Також існують небезпеки пов'язані з блокуванням обладнання або його викидами різного типу енергії, які часто призводять до серйозних або інколи смертельних ушкоджень.

Звідси постає завдання у розроблені схеми автоматизації сортування та переміщення металевих об'єктів, яке може виконуватися в умовах небезпечного середовища для людини, або переміщення в зони, де людина може отримати пошкодження

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

РОЗДІЛ 1. ОПИС ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1. Порівняльний аналіз типів маніпуляторів

У системах автоматизованого переміщення вибір типу маніпулятора є ключовим рішенням, яке визначає ефективність, точність та надійність роботи всієї установки. Тип конструкції маніпулятора впливає на його кінематику, динаміку, габарити, зону досяжності, а також на адаптивність до завдань, таких як сортування, укладання, зварювання, пакування тощо.

Залежно від способу з'єднання ланок, маніпулятори поділяються на послідовні та паралельні:

- Послідовні (Serial) - мають ланцюгову структуру, де кожне наступне з'єднання монтується на попередньому. Характеризуються широким робочим простором, проте схильні до накопичення похибок.
- Паралельні (Parallel) - містять замкнені кінематичні ланцюги, що забезпечують вищу жорсткість та точність, але мають обмежену робочу зону.



(a) serial industrial robot



(b) parallel industrial robot

Рисунок 1 – Класифікація маніпуляторів [3]

Роботи-маніпулятори також класифікуються за кількістю ступенів свободи - це кількість незалежних напрямків руху, в яких маніпулятор здатен переміщати свій кінцевий ефектор. Типовими ступенями свободи є лінійні переміщення вздовж осей X, Y, Z та обертання навколо цих осей (roll, pitch, yaw). Кожен додатковий ступінь свободи забезпечує більшу гнучкість системи, але водночас ускладнює її кінематику та управління. Відповідно до

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

типу кінематичної структури та кількості DoF, маніпулятори поділяються на кілька основних класів:

- Декартові: складаються з трьох лінійних поступальних з'єднань по осях X, Y і Z.
- Циліндричні: один обертальний суглоб (R) та два поступальні (по висоті і радіусу).
- Сферичні: поєднання двох обертальних осей і однієї поступальної, що створює робочу зону у формі частини сфери.
- Полярні: мають поворотну основу, плече та телескопічну ланку, що утворюють кулясту робочу область.
- SCARA: мають два обертальні суглоби у горизонтальній площині, поступальний вертикальний рух і, за потреби, поворот кінцевого ефектора.



Рисунок 2 – Класифікація маніпуляторів за типом конструкції [4]

Таким чином, вибір типу маніпулятора залежить не лише від геометрії робочої зони, а й від типу завдань, що виконуються. Для простих сортувальних

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

або транспортних операцій достатньо 3-4 ступенів свободи, а для складних збиральних або маніпуляційних дій - може знадобитися до 6.

Одним із ключових параметрів при виборі типу маніпулятора є його робоча зона - тобто об'єм простору, у межах якого кінцевий ефектор робота може виконувати дії. Робоча зона визначається кінематичною структурою маніпулятора, довжинами ланок, обмеженнями приводів та положенням бази маніпулятора у просторі. Залежно від типу конструкції, форма робочої зони може бути прямокутна, циліндрична, сферична або складної багатогранної форми.

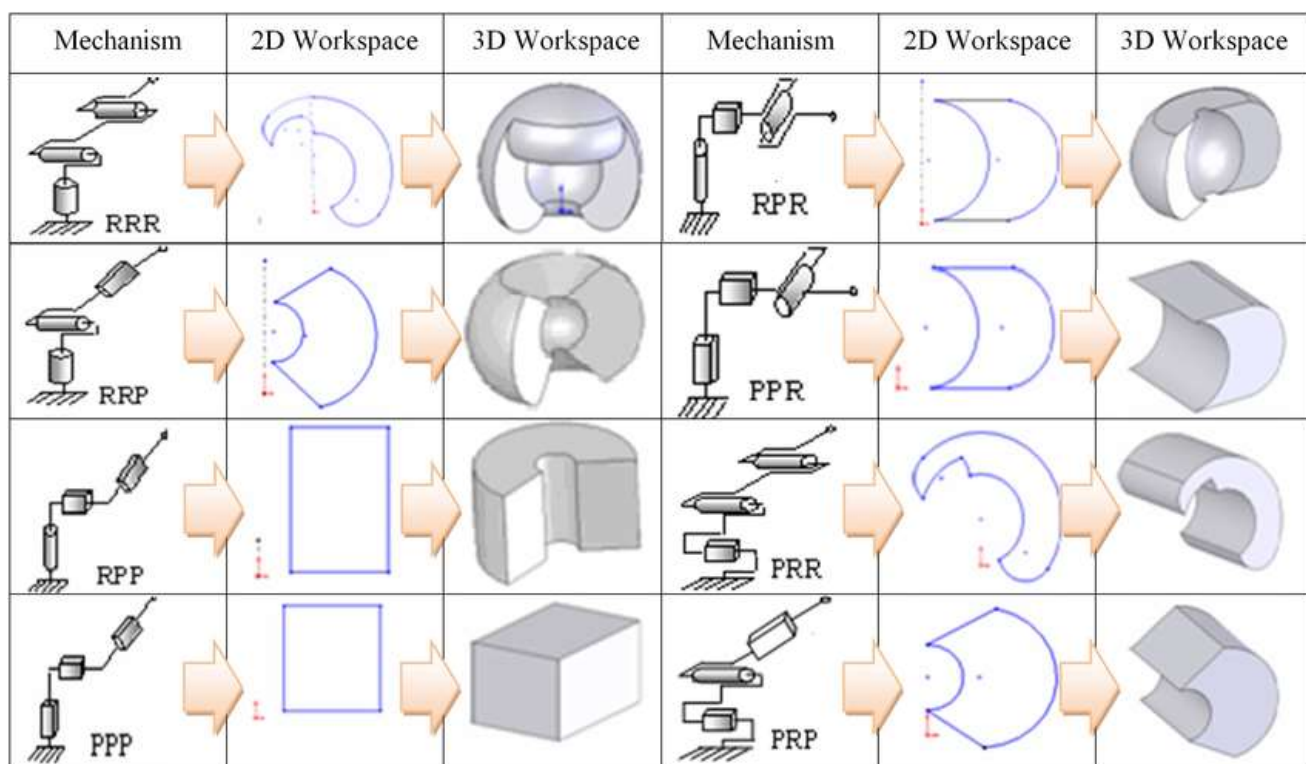


Рисунок 3 – Робоча зона маніпуляторів [5]

При проєктуванні автоматизованої системи необхідно гарантувати, що всі цільові точки (наприклад, місця сортування або контейнери) знаходяться всередині доступної робочої зони. В іншому випадку робот або не зможе виконати задачу, або буде працювати в крайніх положеннях, що знижує точність і прискорює знос механіки.

Кінцевий ефектор - це пристрій, який безпосередньо контактує з об'єктом і виконує дію. Його вибір визначає функціональні можливості

маніпулятора, адаптацію до різних типів продукції та ступінь безпеки. До основних категорій належать [6]:

- Механічні - універсальні, мають пальці або щелепи. Добре працюють з об'єктами з чітко визначеною формою та жорсткістю.
- Пневматичні - забезпечують високу силу стискання, застосовуються для об'єктів зі складною геометрією або великою масою.
- магнітні захвати - призначені для роботи з феромагнітними об'єктами (сталь, залізо). Можуть бути електромагнітними (керованими) або постійними (енергонезалежними).
- Присоски - ефективні при роботі з гладкими поверхнями (листовий метал, скло), але можуть давати збої при нерівностях, отворах або брудній поверхні.
- Зварювальні головки, шпинделі, лазери: використовуються для спеціалізованих технологічних операцій.

Щоб об'єктивно оцінити, наскільки ефективно робот виконує своє завдання, застосовують стандартизовані метрики якості, зокрема ті, що описані в міжнародному стандарті ISO 9283. Основні метрики та їх опис відображені у таблиці 1 [7].

Таблиця 1 – Метрики та їх опис

Метрика	Опис	Формула
Точність позиціонування (Pose Accuracy)	Виражає відхилення між заданою позицією та середнім значенням досягнутих позицій при наближенні до заданої позиції з одного напрямку.	$APp = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2}$
Повторюваність позиції (Pose Repeatability)	Виражає близькість відповідності між досягнутими позиціями після n повторних спроб досягнення однієї й тієї ж позиції в одному і тому ж напрямку.	$RPa = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n - 1}}$
Точність переміщення (Distance Accuracy)	Виражає відхилення в позиціонуванні та орієнтації між відстанню до заданої позиції та середнім значенням досягнутої відстані.	$ADp = \bar{D} - D_c$

Повторюваність переміщення (Distance Repeatability)	Виражає близькість між кількома досягнутими відстанями для однієї й тієї ж заданої позиції, повтореної n разів в одному і тому ж напрямку.	$RD = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - \bar{D})^2}{n - 1}}$
Час стабілізації позиції (Position Stabilization Time)	Кількісно показує, як швидко робот може зупинитися в досягнутому положенні.	-
Точність проходження траєкторії (Path Accuracy)	Характеризує здатність робота переміщати свій рухомий елемент вздовж заданої траєкторії в одному напрямку n разів.	$ATp = \max \sqrt{(\bar{x}_i - x_{ci})^2 + (\bar{y}_i - y_{ci})^2 + (\bar{z}_i - z_{ci})^2}$
Повторюваність проходження траєкторії (Path Repeatability)	Виражає близькість збігу між пройденими шляхами для однієї й тієї ж заданої траєкторії, повторений n разів.	$RTa = \max(3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_i)^2}{n - 1}})$
Мінімальний час позиціонування (Minimum Posing Time)	Час між виходом зі статичного стану і прибуттям в нього при проходженні заданої відстані та/або повороті на заданий кут під керуванням від позиції до позиції.	-

Решта параметрів таких як, наприклад, матеріали елементів, маса маніпулятора та його ланок, фізичні розміри, вантажопідйомність, тип приводів (двигунів), електроспоживання залежать одне від одного, конкретної задачі й співвідношення ціни-якості для виробництва.

1.2. Огляд сучасних рішень на ринку

У сучасній промисловості широке поширення отримали автоматизовані роботизовані системи, здатні виконувати операції переміщення, сортування, пакування та обробки різних об'єктів без участі оператора. Це зумовлено зростаючими вимогами до продуктивності, якості, безпеки персоналу та інтеграції з цифровими системами (MES, ERP, SCADA).

SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) - це один із найпоширеніших типів маніпуляторів на сучасному ринку. Він ідеально підходить для швидкісних операцій у площині XY, таких як сортування,

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

монтаж, нанесення клею тощо. Прикладами таких роботів є серія Yamaha YK-XG, HIWIN RS403.



Рисунок 4 – Yamaha YK-XG [8]



Рисунок 5 – HIWIN RS403 [9]

Для легких об'єктів і конвеєрів використовуються Delta-роботи - паралельні роботи, що забезпечують надвисоку швидкість при роботі з легкими компонентами, зокрема на упаковальних лініях. Приклади таких роботів наведені на рис. 6-7

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



Рисунок 6 – ABB IRB 360 FlexPicker [10]



Рисунок 7 – OMRON Quattro [11]

У випадках, коли потрібна велика робоча зона при порівняно простих лінійних рухах використовуються декартові роботи:



Рисунок 8 – Festo EXCM [12]

Універсальні 6-осьові маніпулятори широко використовуються в задачах, що потребують повної гнучкості, наприклад зварювання, фарбування, складальні операції. Приклад таких маніпуляторів наведено на рис. 9-10.



Рисунок 9 – KUKA KR 6 Agilus [13]

Колаборативні роботи (Cobots) - це спеціальний клас маніпуляторів, розроблений для безпечної роботи поряд з людиною без потреби в огороженнях або ізоляції. Оператор може фізично перемістити маніпулятор у бажану точку.

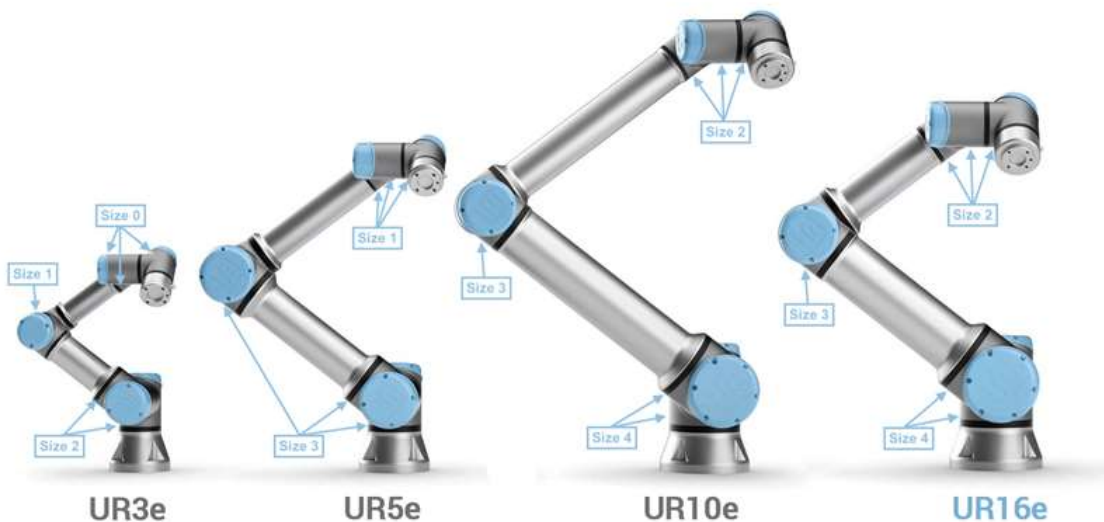


Рисунок 10 – Universal Robots E-series [14]

Окрім окремих роботів, на ринку представлені інтегровані рішення, що включають маніпулятори, захвати, візуальні системи, програмні рішення для інтеграції зі SCADA/ERP.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

1.3. Взаємодія з операторами

У системах автоматизованого переміщення оператор виконує не лише функцію контролю, а й активно бере участь у налагодженні, обслуговуванні та переналаштуванні роботизованих пристроїв. Високий рівень інтеграції людини та машини є критично важливим для стабільної, безпечної та ефективної роботи виробничої лінії, особливо в умовах гнучкого або змінного виробництва.

Інтерфейс користувача є основним засобом взаємодії оператора з системою автоматизації. Типовий НМІ включає:

- Сенсорні панелі (touch-panel displays) з візуалізацією станів, помилок і параметрів.
- Ручні програматори (teach pendants) - для роботи з роботами, де необхідна інтерактивна побудова траєкторій.



Рисунок 11 – Ручний програматор KUKA SmartPad [15]

Оскільки роботизовані системи здійснюють активні переміщення елементів, наприклад, обертання ланок, переміщення захвату або маніпуляції важкими об'єктами, вони становлять потенційну загрозу для людини, яка перебуває поруч. Тому забезпечення безпеки оператора є обов'язковим елементом проєктування таких систем. Засоби безпеки включають як фізичні,

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

так і програмні рішення. До фізичних належать аварійні кнопки (E-STOP), світлові бар'єри, кінцеві вимикачі, блокування доступу до рухомих частин під час роботи. Програмні засоби безпеки реалізуються через обмеження швидкості руху, створення віртуальних меж у просторі, а також моніторинг сили чи моменту взаємодії з об'єктами. Крім того, важливою функцією є "безпечна зупинка" (Safe Stop) - автоматичне припинення руху при виявленні загрози з можливістю безпечного відновлення. У колаборативних роботах ці функції інтегруються на рівні прошивки відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 10218-1.

Також сучасні системи автоматизації підтримують віддалене керування та моніторинг через планшети, смартфони, ноутбуки; push-сповіщення на випадок зупинки, помилок або досягнення виробничих цілей та користувацькі профілі з різними рівнями доступу

1.4. Вибір типу кінематичної конструкції та кінцевого ефектора

Оскільки тип кінематичної конструкції впливає на багато факторів, включаючи розмір робочої зони, потрібно обрати конструкцію під необхідні об'єкти для сортування та переміщення.

Авторами [16] зазначено, що SCARA подібні маніпулятори займають менше місця, в порівнянні з декартовими, їх легше встановлювати й вони можуть працювати в обмежених просторах. Тому вони зазвичай використовують у виробничій лінії для виконання задач пакування, сортування, вирівнювання, зварювання і збірки:

«SCARA manipulators take up less space than Cartesian systems, are easier to install, and can operate without the need for large areas. For this reason, the processes such as packaging, sorting, alignment, planar welding, and assembly in the production lines are usually performed with SCARA-type manipulators»

Оскільки постає задача переміщення саме металевих об'єктів, потрібно обрати тип кінцевого ефектора.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



Рисунок 12 – механічні кінцеві ефектори [17]



Рисунок 13 – кінцеві ефектори для пакування [18]

Компанія HVR Magnetics - виготовлювач електромагнітних систем, порівнює використання магнітних та механічних типів захватних пристроїв [19]. Зазначається, що механічні захватні пристрої не використовуються, оскільки мають нижчу надійність у випадку роботи зі сталевими круглими прутками:

«Previously used EOAT - mechanical grippers. Why been replaced: poor reliability, failing to meet client's requirement; complicated & troublesome design»

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		13



Рисунок 14 – електромагнітні захватні пристрої [20]

Використання постійного електромагніта проти звичайного на прикладі переміщення металевих пластин [21], забезпечує кращу безпеку, оскільки постійні електромагніти не потребують постійного живлення і використовують його лише під час намагнічування, тобто у разі раптового відключення живлення, вони будуть утримувати пластини. Також вони забезпечують краще енергоощадження:

«Superior safety - can remain holding of the plates even in a sudden power failure. Energy-saving - only needs electricity for magnetization and demagnetization, no energy consumed during the lift.»



Рисунок 15 – постійний електромагнітний захватний пристрій [22]

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Також можливе використання вакуумного захвату, проте він не підходить для об'єктів з нерівними поверхнями чи отворами, що може становити небезпеку для робочого персоналу [23]:

«Due to the punched holes, vacuum cups cannot hold the sheet steadily and might drop it»



Рисунок 16 – вакуумний захватний пристрій [24]

1.5. Архітектури систем автоматизації

Керування в таких типах систем може бути як програмним, так і на основі регуляторів, залежно від наявності ланки, яка надає зворотний зв'язок. Обчислення програмного керування зазвичай відбувається на ЕОМ (ПЛК або мікроконтролерах).

Для точного керування роботи маніпулятори можуть використовувати різні типи датчиків, наприклад, датчики сили та тиску тощо. Використання камер з алгоритмами обробки зображень дозволяють отримувати дані про розміри, форму, тип матеріалу та розміщення об'єкта.

Інтегрування штучного інтелекту або алгоритмів машинного навчання додає адаптивності роботам до зміни умов на виробництві. А інтернет речей дозволяє віддалено спостерігати та керувати системою, даючи дані для визначення стану роботів, кількість помилок та іншу аналітику в реальному

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

часі. Використання хмарних сервісів може прибрати необхідність у використанні ЕОМ, та покращити швидкодію системи.

Використання технологій віртуальної та доповненої реальностей додають кращу візуалізацію протікання процесів у системі.

Загальний вигляд схем проілюстровано на Рис.17 - Рис.18.

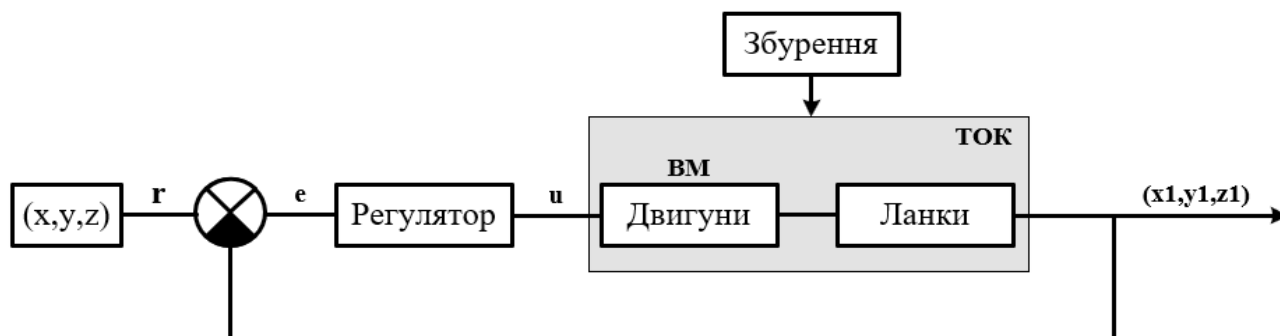


Рисунок 17 – загальна схема АСК на основі регуляторів

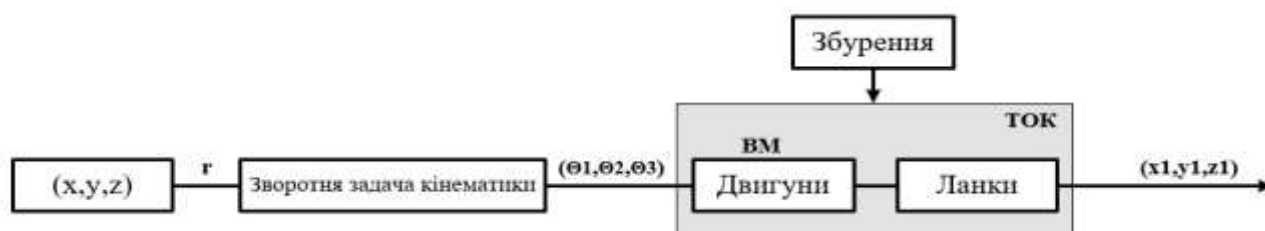


Рисунок 18 – загальна схема АСК на програмного керування через ЗЗК

Висновок розділу 1: у цьому розділі було розглянуто ключові технічні аспекти роботизованих маніпуляторів, включаючи їх класифікацію, робочу зону, типи ефекторів, сучасні промислові рішення, взаємодію з операторами та архітектури автоматизованих систем. Проведений аналіз дозволяє обґрунтовано обрати конфігурацію маніпулятора типу SCARA з електромагнітним захватом як найбільш доцільне рішення для задачі автоматизованого переміщення металевих об'єктів. Обрана структура забезпечує баланс між швидкодією, точністю, безпекою та інтеграцією в сучасні інтелектуальні виробничі середовища.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА

2.1. Опис експериментальної установки

Робот маніпулятор складається із двох RC серводвигунів з обмеженим кутом обертання $0^\circ \dots 180^\circ$ та одного RC серводвигуна неперервного обертання. Двигуни з обмеженнями відповідають за горизонтальний рух на площині. Неперервний двигун відповідає за вертикальний рух в просторі за допомогою зубчастої рейки та шестерні (rack and pinion). В якості кінцевого ефектора використано електромагніт. Моделювання структури відбувалося в програмному середовищі SolidWorks.

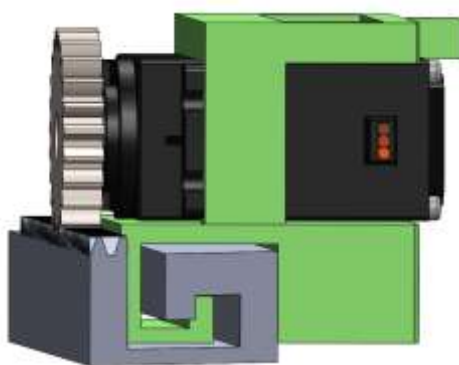


Рисунок 19 – RC двигун в системі зубчастої рейки та шестерні

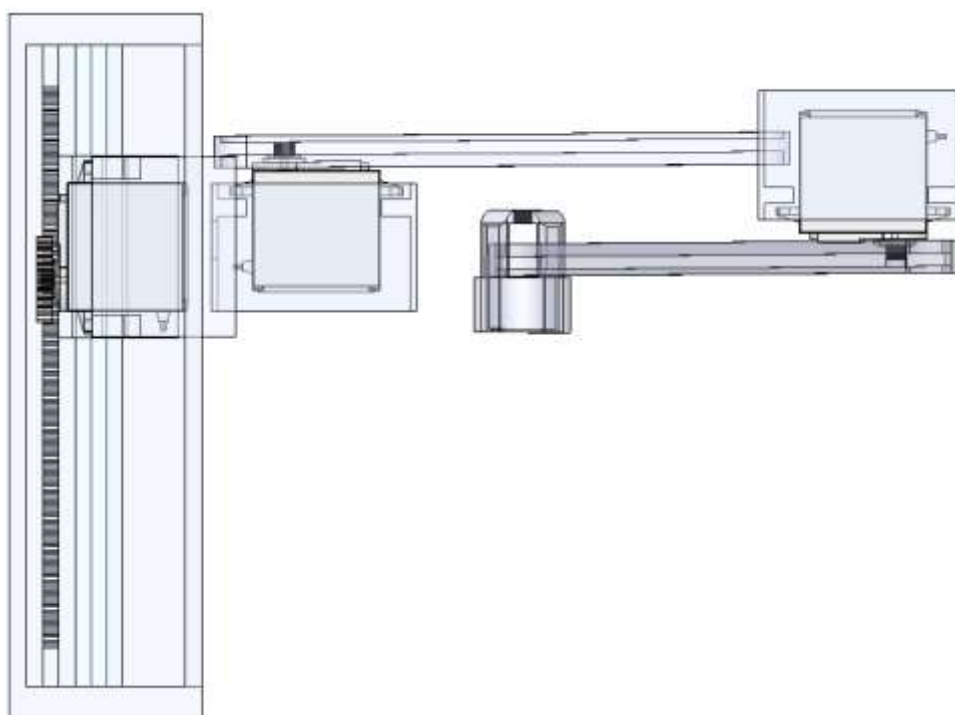


Рисунок 20 – вигляд експериментальної установки

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Завданням об'єкта керування є переміщення певного тіла із однієї позиції в іншу, тобто на вхід подаються координати тіла, після чого за допомогою зворотної задачі кінематики визначаються необхідні кути ланок для досягнення цієї позиції, після того, як двигуни повернулися на ці кути, ланки перемістили кінцевий ефектор у задане положення. Узагальнена схема наведена на Рис.21.

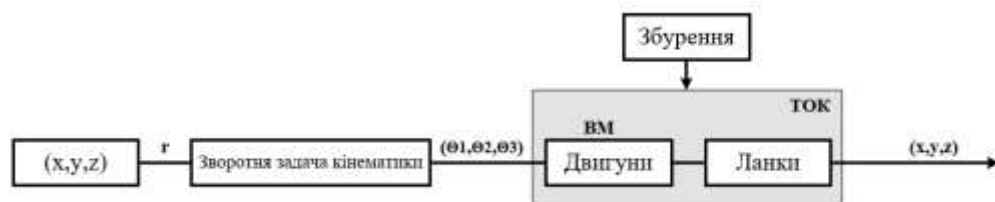


Рисунок 21 – Узагальнена схема АСК з програмним керуванням через ЗЗК

2.1.1. Опис серводвигунів

Серводвигун - пристрій, який використовується для перетворення електричного сигналу в обертальний або поступальний рух. [25]

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ — англ. pulse-width modulation, PWM), або модуляція за тривалістю імпульсів — процес керування шириною (тривалістю) високочастотних імпульсів за законом, який задає низькочастотний сигнал. [26]

Звичайний серводвигун керується ШІМ сигналом, ширина імпульсу якого визначає кут повороту. Зазвичай імпульси шириною в 1 мілісекунду відповідають початковій нульовій позиції, а імпульси шириною в 2 мс – повороту в 180° градусів. Типова частота повторення імпульсів 20 мс (0.02с), що відповідає 1/0.02с – 50 Гц. Тобто в 1 секунді 50 повторень, в кожному з яких високий імпульс триває 1-2мс., а решту 18-19мс. іде низький рівень.

Відношення високого сигналу до періоду – прогальність (Duty Cycle) [27]. Тобто у даному випадку прогальність змінюється від 5% (1/20) до 10% (2/20). Перетворення прогальності назад у ширину імпульсу відбувається шляхом її множення на період сигналу, а перетворення ШІМ сигналу у градуси за формулою:

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$\theta^{\circ} = \frac{pwm - pwm_min}{pwm_max - pwm_min} \cdot 180^{\circ}$$

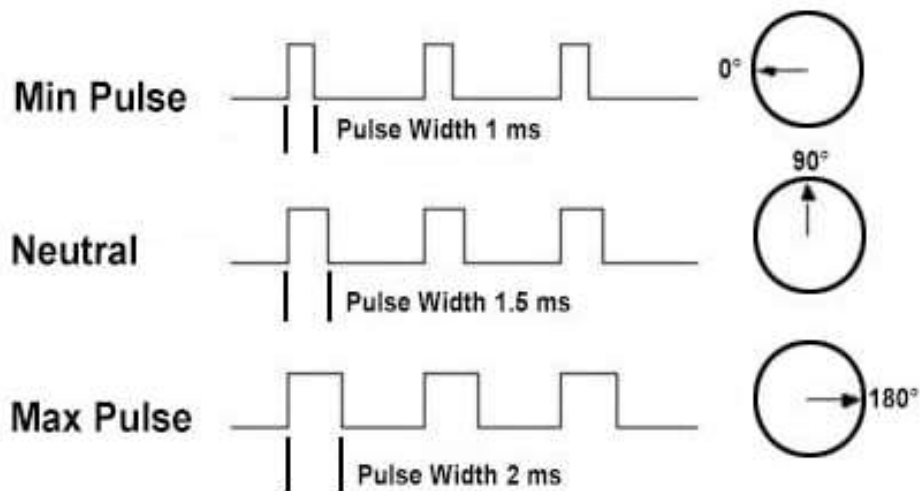


Рисунок 22 – керування серводвигуном через ШІМ [28]

Вхідний ШІМ сигнал подається на плату, яка перетворює його на відповідну напругу, після чого напруга завдання надходить на суматор, де від неї віднімається напруга зворотного зв'язку від потенціометра. Після чого вона підсилюється і подається на електродвигун, який приводить в рух внутрішню систему шестерней, які в свою чергу обертають вал сервоприводу. При зміні положення валу змінюється і положення рухомого контакту потенціометра, відповідно змінюється опір і плата може виміряти напругу відповідного положення та порівняти із заданою, що створює замкнуту систему.

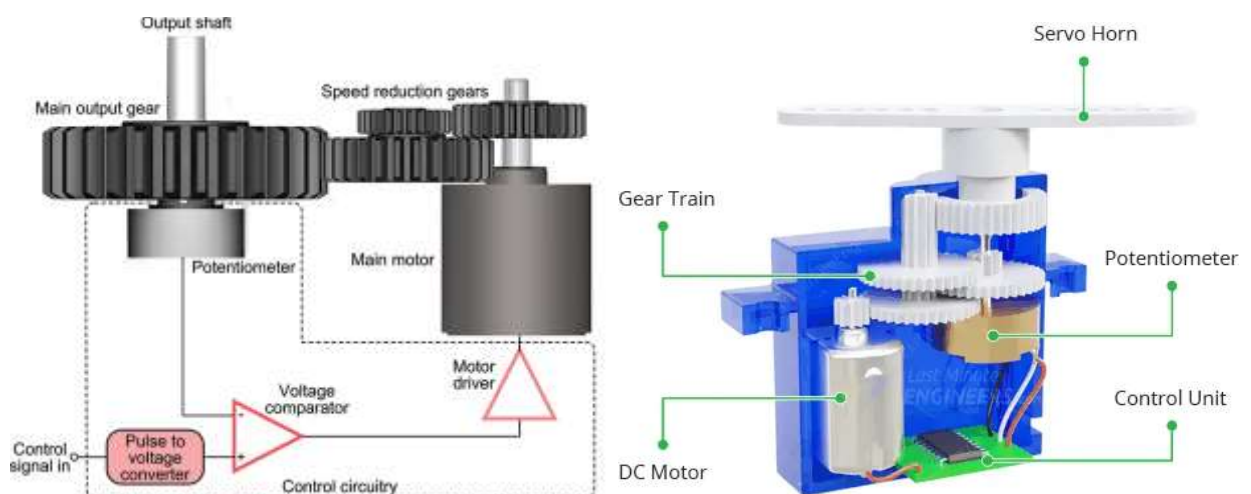


Рисунок 23 – будова серводвигунів [29][30]

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		19

Зазвичай звичайні серводвигуни мають обмеження в куті повороту через обмежений діапазон повороту потенціометра, дана проблема вирішується прибиранням потенціометра, такі серводвигуни називаються серводвигунами неперервного обертання. Проте відсутність потенціометра також робить систему розімкнутою, тому такий серводвигун буде обертатися постійно, а ширина імпульсів ШІМ сигналу контролює швидкість обертання – більше 1.5мс відповідає руху за год. стрілкою, менше руху проти год. стрілки.

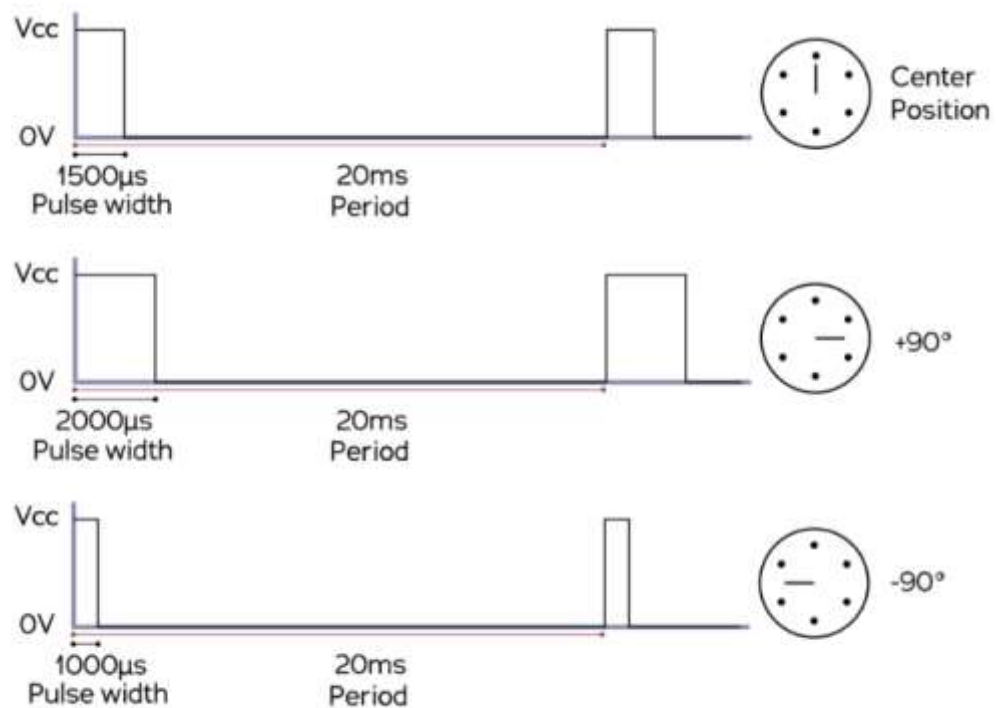


Рисунок 24 – керування неперервним серводвигуном через ШІМ [31]

2.2. Структурно-параметрична схема об'єкта керування

Об'єктом керування є робот маніпулятор, який являє собою багатовимірну, стаціонарну, динамічну, лінійну, цифрову систему із зосередженими параметрами. На виході об'єкта отримуються координати кінцевого, бажаного положення, шляхом обертання валу двигунів. Ілюстрація керувань ланками та виходів системи наведено на Рис.25, де U1, U2, U3 це сигнали керування, які складаються з прогальностей D1, D2, D3 та часу подачі керування T1 для U3.

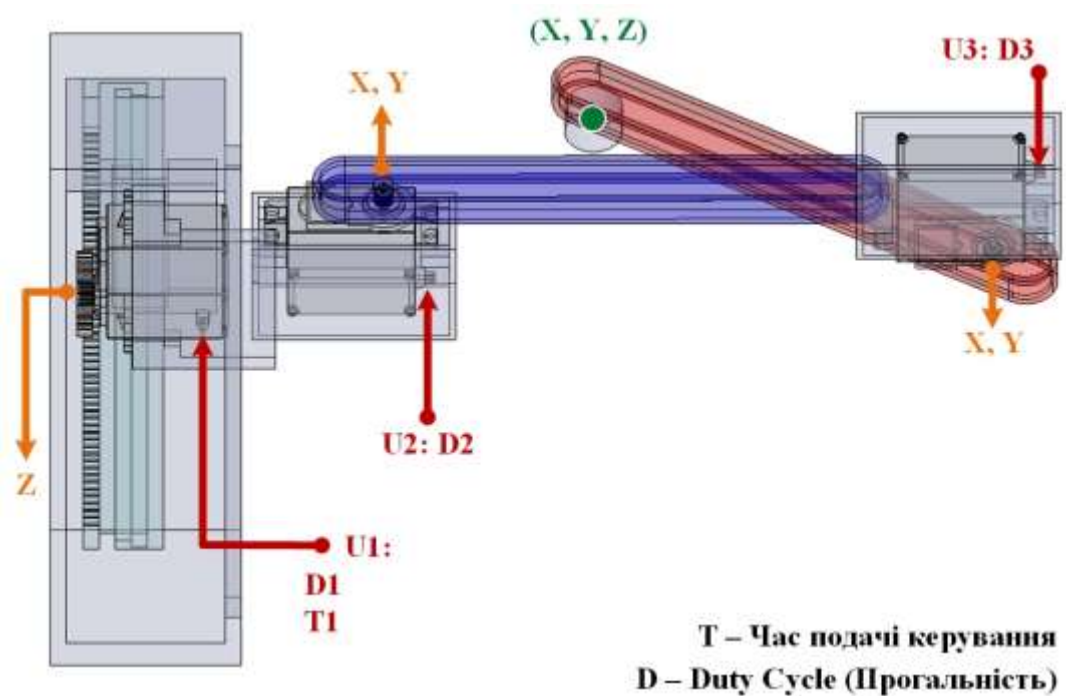


Рисунок 25 – ілюстрація керувань та виходів системи

Структурно-параметричну схему наведено на Рис.26.

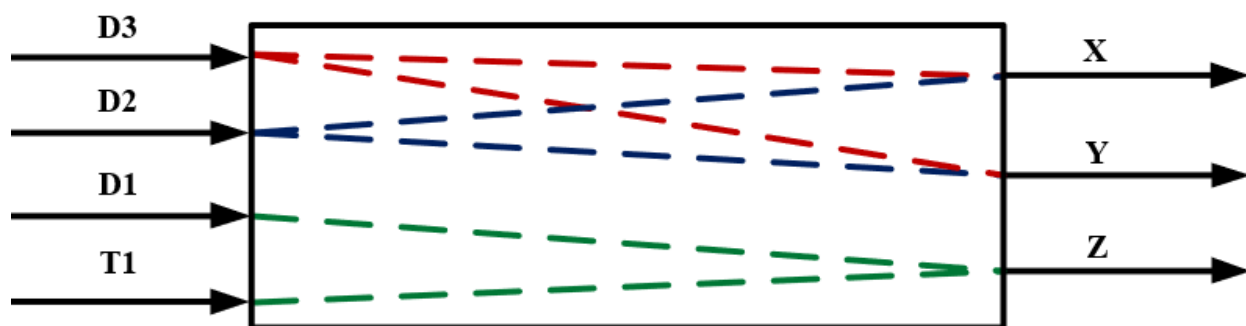


Рисунок 26 – структурно-параметрична схема

Визначення кінцевої позиції при заданому керуванні визначається за допомогою прямої задачі кінематики, яка приймає в себе вихід серводвигунів – кути повороту, та повертає координати кінцевого ефектора.

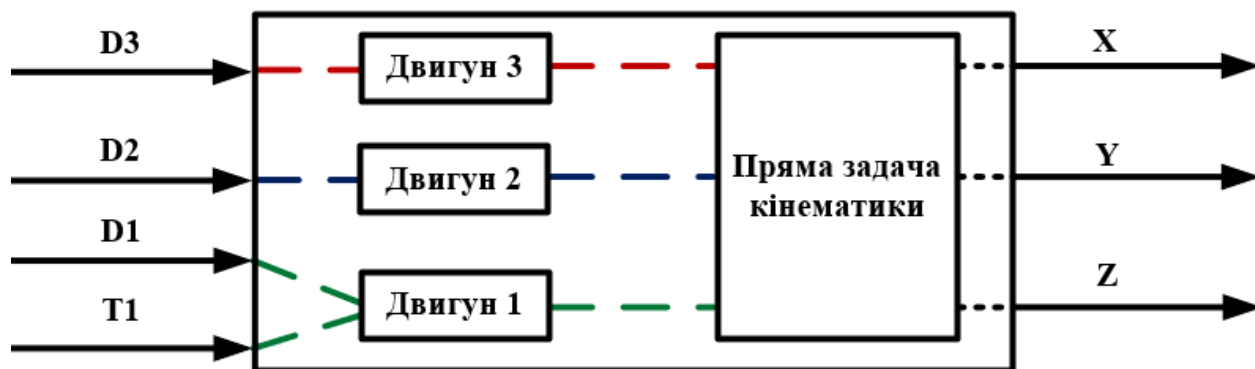


Рисунок 27 – структурно-параметрична схема

2.3. Моделювання серводвигунів

2.3.1. Моделювання звичайного серводвигуна

Моделювання виконано в середовищі Matlab Simulink за допомогою елементів Simscape Toolbox. Загальна схема керування серводвигуном наведена на Рис.28 Керування відбувається через блок PWM, на вхід якого подається прогальність, а на виході напруга в 1 вольт підіймається до 6 та подається на блок Controlled Voltage Source, який забезпечує зв'язок між компонентами Simscape та поступає на пін керування S блоку RC Servo.

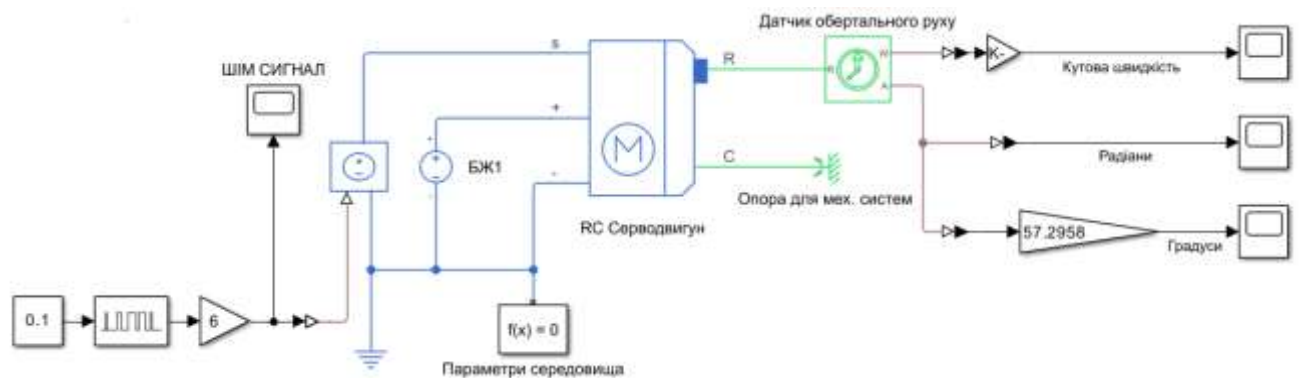


Рисунок 28 – математична модель серводвигуна

Вихід блоку «ШІМ СИГНАЛ» на Рис.29. показує ШІМ сигнал, по ньому можна побачити що високий рівень сигналу, в даному випадку тривалістю в 2мс., подається один раз на 20мс (0.02с.), що відповідають куту повороту у 180°.

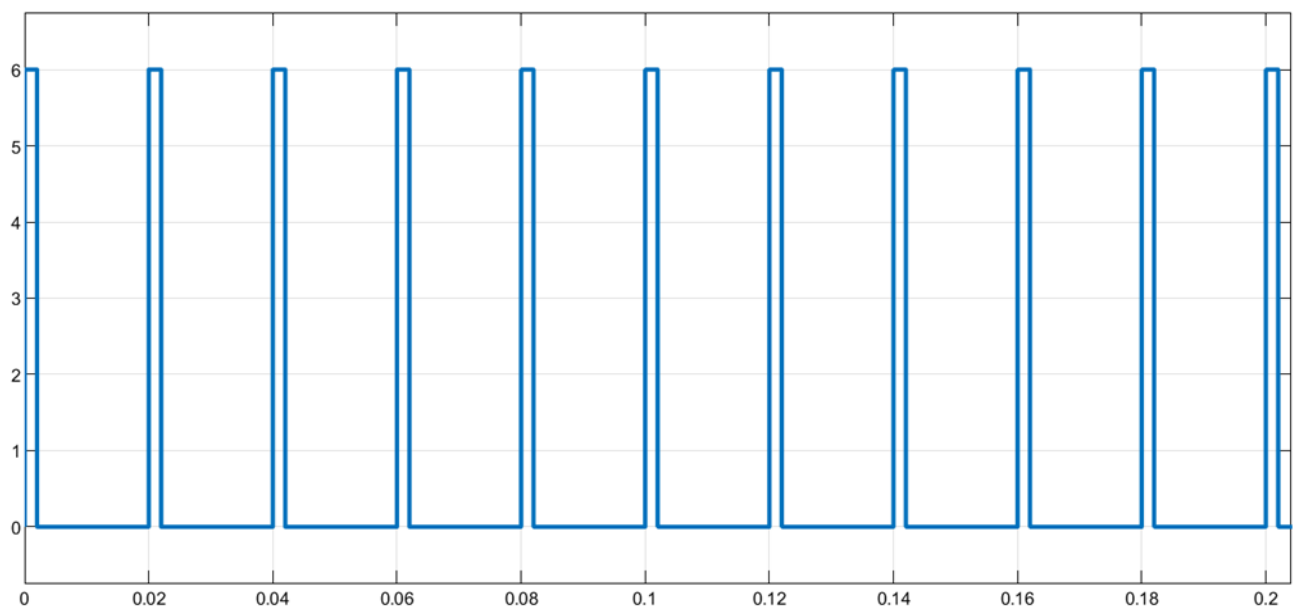


Рисунок 29 – ШІМ СИГНАЛ

Блок Voltage Source забезпечує постійне джерело живлення у 6 В., плюсовий контакт якого під'єднаний до позитивного живлення двигуна, а мінусовий з'єднаний зі спільною землею та під'єднаний до негативного контакту двигуна.

Блок Solver Configuration (параметри середовища) забезпечує правильне вирішення фізичних рівнянь моделей Simscape.

В якості серводвигуна обрано MG995 Tower Pro, а параметри блоку RC Servo відповідають його даташиту, із зазначенням нульового початкового кута (Initial Targets):

RC Servo Auto Apply

SettingsDescription

NAME	VALUE
Electrical Torque	
> Stall torque	10 cm*kg
> Time to travel 60 degrees (n...	0.13 s
> Corresponding nominal volta...	6 V
> Rotational range	[0, 180] deg
> Corresponding pulse widths	[1000, 2000] us
Control	
> Pulse threshold	3 V
> Signal input resistance	18 kOhm
> Angle resolution	0.1 deg
> Angle measurement error	0 deg
Initial Targets	
<input checked="" type="checkbox"/> Angle	
Priority	High
Value	0 deg
<input checked="" type="checkbox"/> Speed	
Priority	High
Value	0 deg/s
<input checked="" type="checkbox"/> Torque	
Priority	None
Value	0 N*m
<input checked="" type="checkbox"/> Width of last pulse	
Priority	Low
Value	1 ms

▼ Mechanical		
> Backdrive torque (unpowered)	0.5	cm*kg
> Gear reduction ratio	276	
> Rotor inertia	0.01	cm^2*g
> End-stop angles	[-5, 185]	deg
> End-stop stiffness	1e6	N*m/rad
> End-stop damping	0.01	N*m*s/rad

Рисунок 30 – параметри блоку RC Servo

На виході із блоку маємо механічний вихід ротора R, який здійснює обертальний рух, та рух корпусу двигуна С.

Оскільки вихідний пін R двигуна є механічним рухом, то його потрібно кількісно виміряти за допомогою блоку Ideal Rotational Motion Sensor, який на виході може видавати прискорення, кутову швидкість та кут:

Ideal Rotational Motion Sensor
Auto Apply

Settings
Description

NAME	VALUE
▼ Parameters	
Measurement reference	Absolute
<input type="checkbox"/> Acceleration	
<input checked="" type="checkbox"/> Velocity	
<input checked="" type="checkbox"/> Position	
<input type="checkbox"/> Wrap angle to [0, 2*pi]	
> Initial angle	0 deg

Рисунок 31 – Ideal Rotational Motion Sensor

Дослідимо результати виходу двигуна при різних значеннях прогальності ШІМ сигналу на Рис.32. Згідно з графіками можна дійти висновку, що отримані кути відповідають дійсності, а кутові швидкості відповідають заявленій у даташиті швидкості досягання 60 градусів протягом 0.13с, тобто 180 градусів досягаються за 0.39 секунд. Кутова швидкість також відповідає дійсності – $60 \cdot \frac{1}{0.13} = 461.5$ град/сек

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

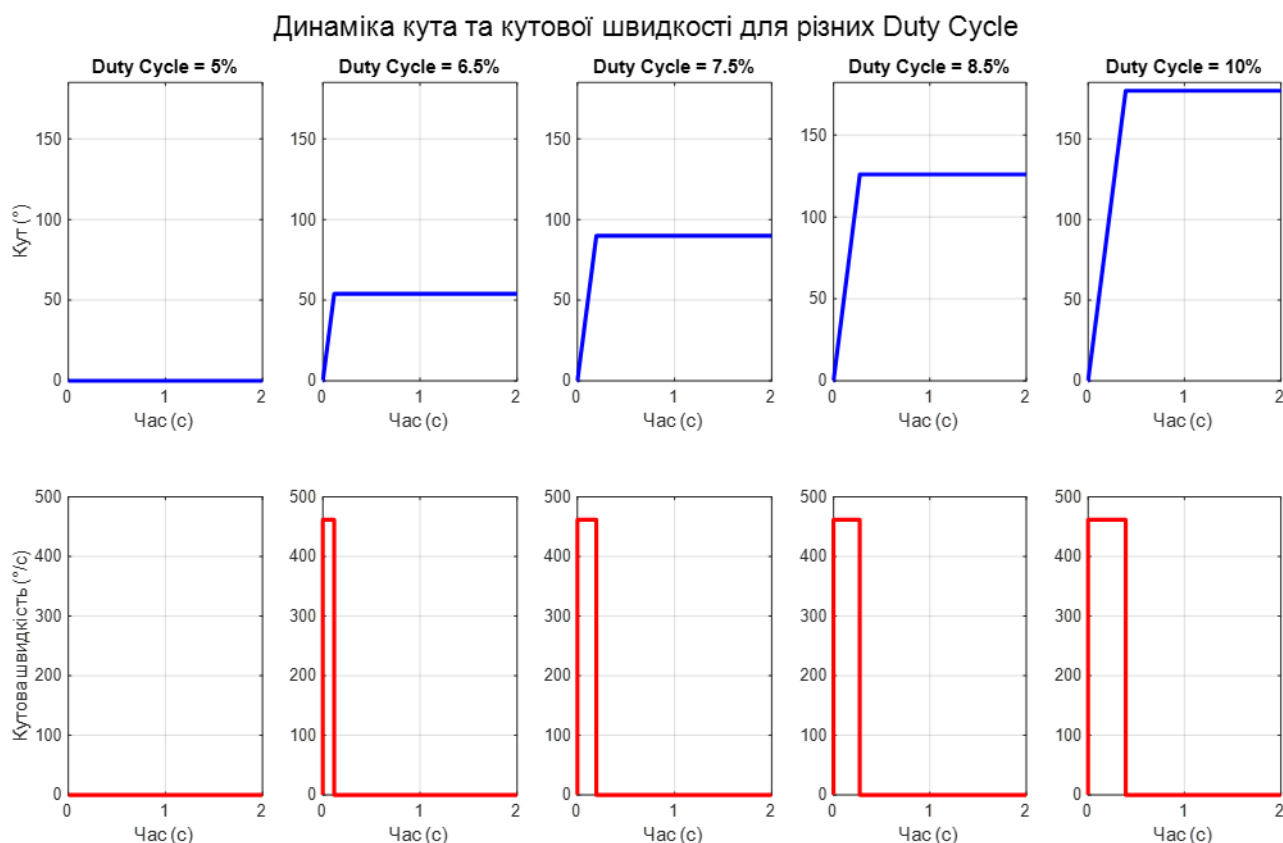


Рисунок 32 – динаміка серводвигуна при різних значеннях прогальності

Для перевірки здатності руху моделі в протилежну сторону, кожену секунду подано керування різне керування, а саме 6.5% (54 градуси), 8.5% (126 градусів), 7.5% (90 градусів), та 10% (180 градусів),

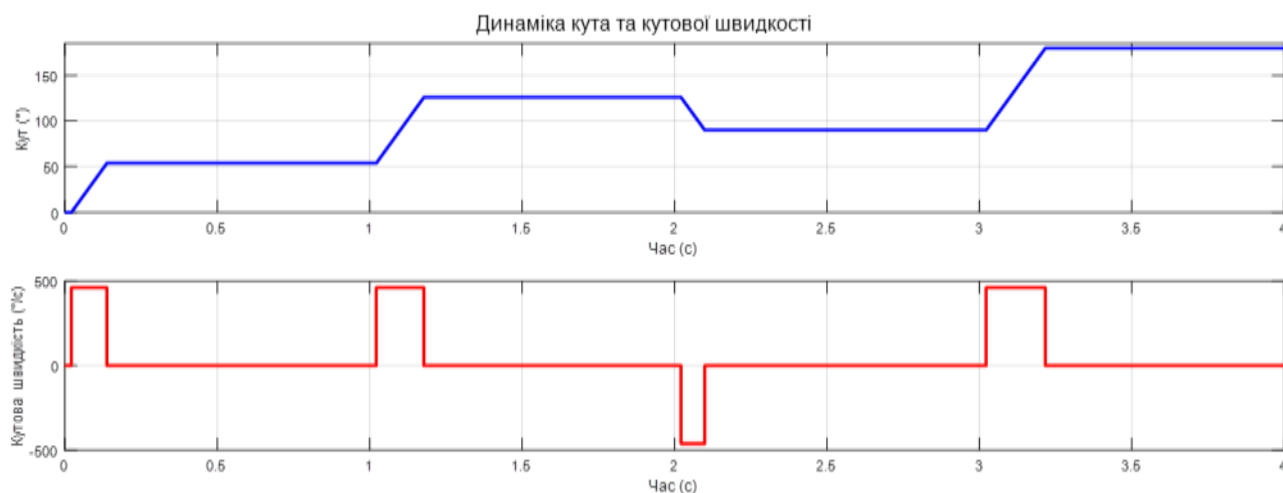


Рисунок 33 – Динаміка серводвигуна при різних значеннях прогальності

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ДПЛА12.04.00.000ПЗ

Арк.

25

2.3.2. Моделювання серводвигуна неперервного обертання

Оскільки неперервний серводвигун не містить обмеження в куті повороту, то його моделювання здійснюється через ручний збір компонентів з яких він складається.

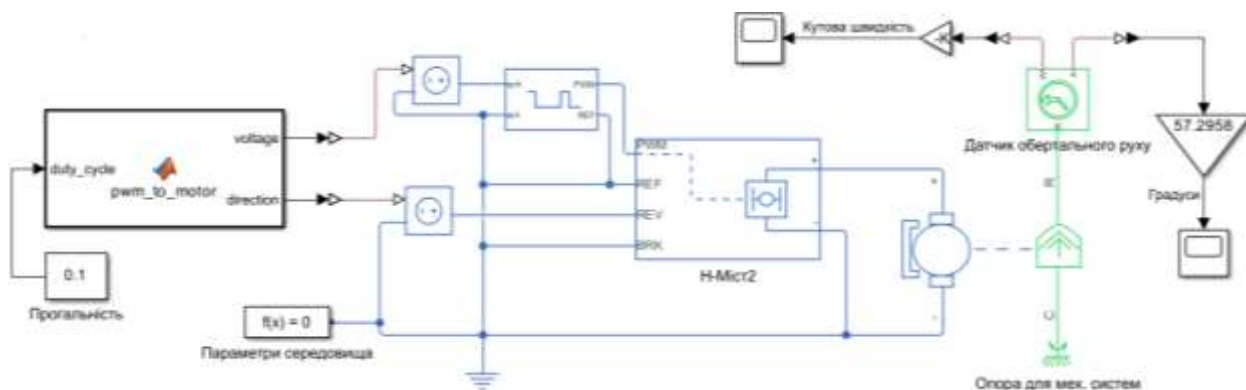


Рисунок 34 – код перетворення прогальності

Прогальність за допомогою MATLAB Function блоку перетворюється у напругу та відповідний напрямок:

```
function [voltage, direction] = pwm_to_motor(duty_cycle)
    pwm_width = duty_cycle*20;
    neutral = 1.5;
    min_pulse = 1;
    max_pulse = 2;
    if pwm_width < neutral
        voltage = 6 * (neutral - pwm_width) / (neutral - min_pulse);
        direction = 5;
    elseif pwm_width > neutral
        voltage = 6 * (pwm_width - neutral) / (max_pulse - neutral);
        direction = 0;
    else
        voltage = 0;
        direction = 0;
    end
end
```

Рисунок 35 – код перетворення прогальності

Блок Controlled PWM Voltage створює ШІМ сигнал із частотою в 50Hz залежно від вхідної напруги. Для керування напрямком використовується блок H-Bridge (H-Mіст) який приймає на вхід піну PWM ШІМ сигнал, та змінює напрямок коли на пін REV подається напруга, що перевищує встановлене в налаштуваннях порогове значення. Блок DC Motor імітує двигун постійного струму, який на відміну від RC SERVO не містить обмеження в кутовому діапазоні.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

H-Bridge		Auto Apply
Settings	Description	
NAME	HBRIDGE	
Modeling option	No thermal port	
Simulation Mode & Load Assumptions		
Power supply	Internal	
Simulation mode	Averaged	
Regenerative braking	Always enabled (suitable for linearization)	
Load current characteristics	Smoothed	
Input Thresholds		
Enable threshold voltage	1	V
PWM signal amplitude	5	V
Reverse threshold voltage	1	V
Braking threshold voltage	1	V
Bridge Parameters		
Output voltage amplitude	8	V
Total bridge on resistance	0.1	Ohm
Freewheeling diode on resistance	0.05	Ohm

DC Motor		Auto Apply
Settings	Description	
NAME	DCMOTOR	
Modeling option	No thermal port	
Selected part	<click to select>	
Electrical Torque		
Field type	Permanent magnet	
Model parameterization	By stall torque and no-load speed	
Armature inductance	12e-6	H
Stall torque	0.24e-3	N*m
No-load speed	461	deg/s
Rated DC supply voltage	5	V
Rotor damping parameterization	By damping value	
Mechanical		
Rotor inertia	0.01	cm^2*mm^2/g
Rotor damping	0	N*m*s/rad
Initial rotor speed	0	deg/s

Рисунок 36 – налаштування блоків H-Bridge та DC Motor

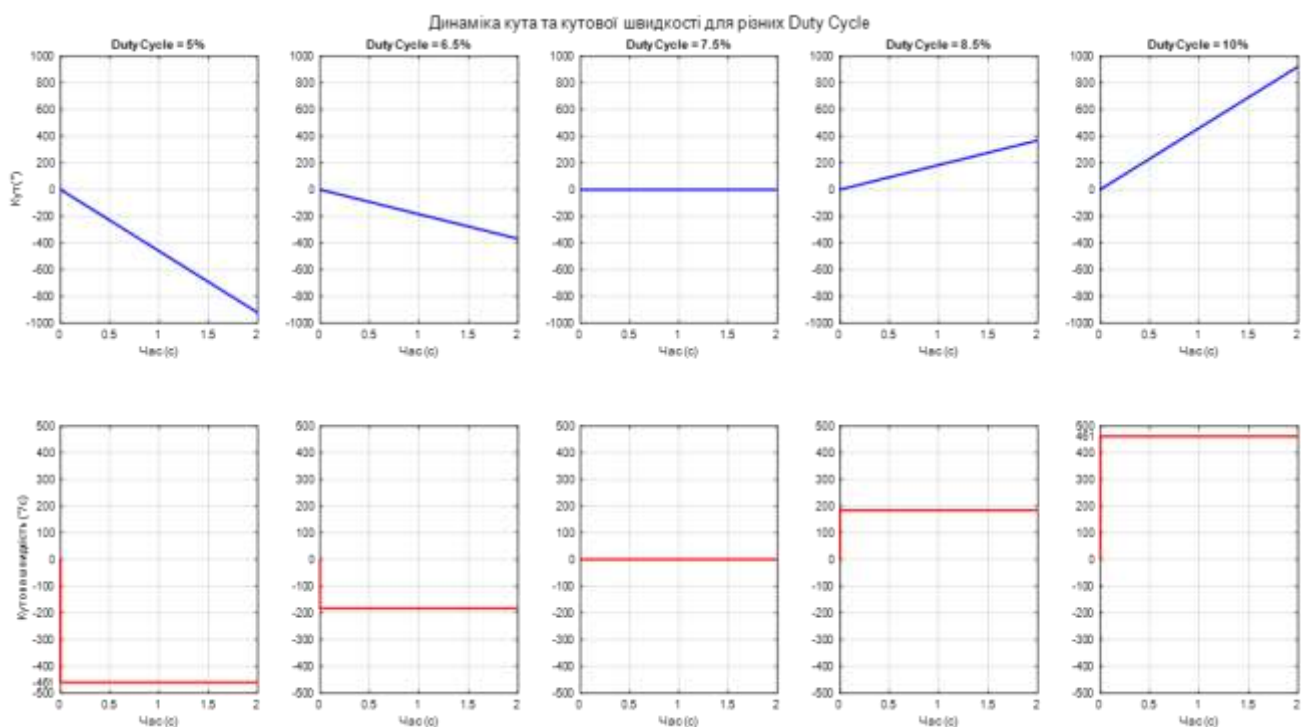


Рисунок 37 – динаміка неперервних серводвигунів при різних значеннях прогальності

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ДПЛА12.04.00.000ПЗ

Арк.

27

При щосекундній зміні керування на 6.5%, 8.5%, 7.5% та 10% динамічна характеристика набуває наступного вигляду:

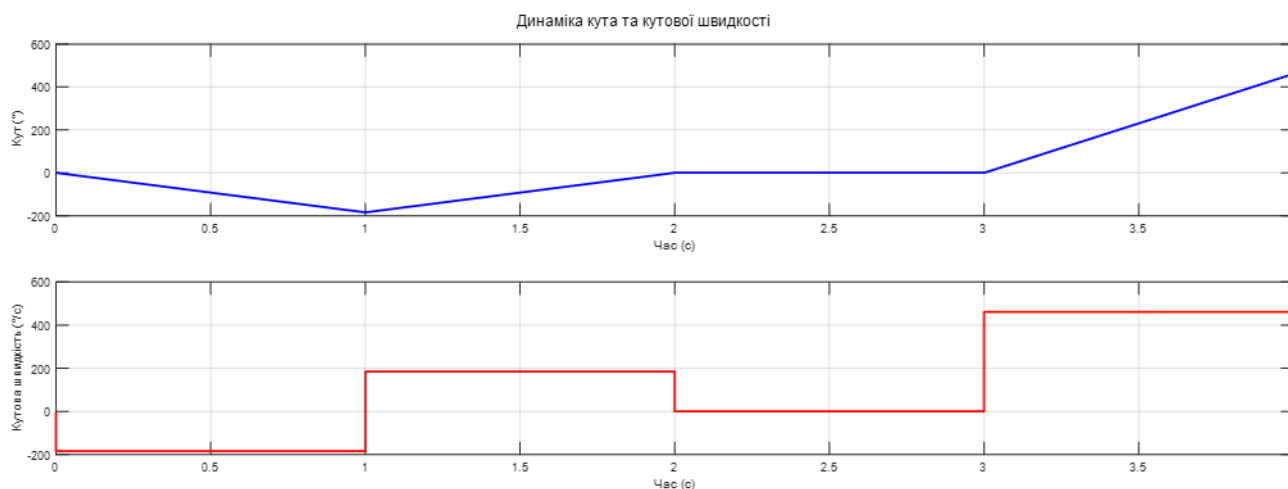


Рисунок 38 – динаміка неперервних серводвигунів при різних значеннях прогальності

2.4. Вирішення задачі кінематики

Для визначення координати кінцевого ефектора маніпулятора за відомими узагальненими координатами, використовується пряма задача кінематики. У випадку невеликої кількості ланок, можна використати звичайний геометричний підхід:

Перша система відліку пов'язана із точкою кріплення першої ланки маніпулятора та початку координат – $O(x_0, y_0)$. Друга с.в. пов'язана із точкою кріплення другої ланки до першої – $A(x_a, y_a)$. Спочатку потрібно знайти зміщення системи координат другої ланки відносно системи координат першої, тобто координати точки А, у с.к. точки О. Кут першої ланки в початковій позиції 0, отже

$$\begin{cases} x_a = l_1 \cos(\theta_1) \\ y_a = l_1 \sin(\theta_1) \end{cases}$$

Розглянемо систему координат точки А та знайдемо координати кінцевої точки в ній:

$$\begin{cases} x'_g = l_2 \cos(\theta_2) \\ y'_g = l_2 \sin(\theta_2) \end{cases}$$

Згідно з конструкцією, ланка l_1 може рухатися проти год.стрілки, а ланка l_2 за год.стрілкою, отже координати кінцевого ефектора у системі координат ланки l_1 без врахування зміщення l_2 .

$$\begin{cases} x_g = l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ y_g = l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \end{cases}$$

Координати кінцевого ефектора у базовій системі координат із врахуванням зміщення:

$$\begin{cases} x = x_a + x_g = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(180^\circ + \theta_1 - \theta_2) \\ y = y_a + y_g = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(180^\circ + \theta_1 - \theta_2) - 4 \end{cases}$$

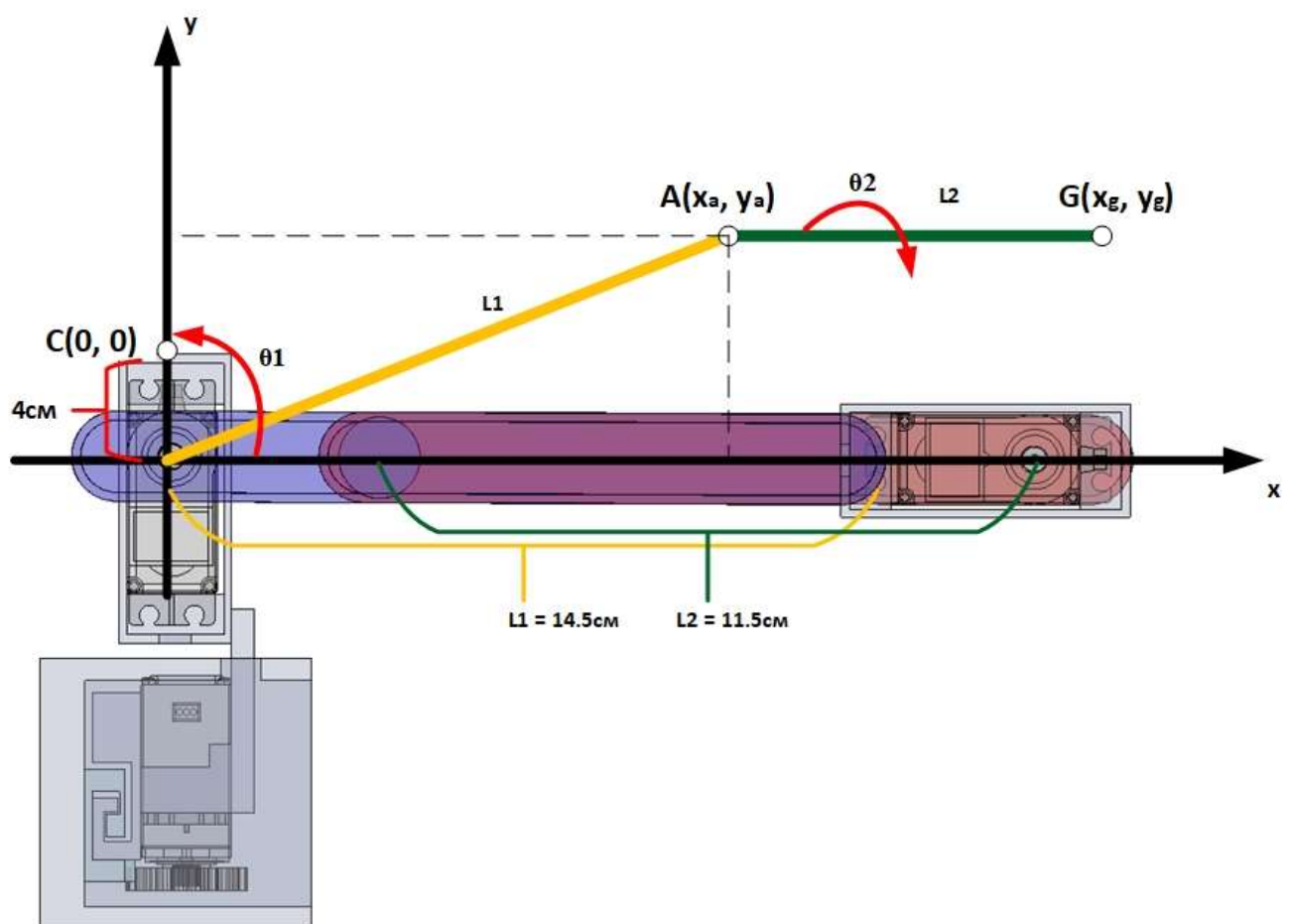


Рисунок 39 – ПЗК

Визначення z координати тіла (висота) виконується шляхом фізичних розрахунків, оскільки неперервний серводвигун, що відповідає за рух по z координаті, встановлений на вертикальній, фіксованій рейці та рухається завдяки шестерні. Шестерня має наступні параметри: M (модуль) = 1мм, N (кількість зубців) = 25, Pitch Diameter (дільний діаметр) = $M \cdot N = 25$ мм., Pitch

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		29

(крок зубців) = $\pi \cdot M$. Тоді залежність між переміщенням та кутом повороту встановлюється наступною формулою:

$$H = \frac{N \cdot \pi \cdot M \cdot \theta^\circ}{360^\circ} = \frac{25\pi \cdot \theta^\circ}{360^\circ} [\text{мм}]$$

Звідси кут повороту, необхідний для проходження заданої відстані:

$$\theta^\circ = \frac{360^\circ \cdot H}{25\pi}$$

Час, протягом якого буде здійснено керування (час обертання):

$$T = \frac{\theta^\circ(H)}{w} [c], \text{ де } w - \text{кутова швидкість}$$

Згідно з параметрами двигуна, кутова швидкість при напрузі 4.8В та 6В:

$$w_{4.8\text{В}} = \frac{60^\circ}{0.17\text{сек.}} = \frac{352.9^\circ}{1\text{с.}} [\text{град/с}]$$

$$w_{6\text{В}} = \frac{60^\circ}{0.13\text{сек.}} = \frac{461.5^\circ}{1\text{с.}} [\text{град/с}]$$

Тоді час:

$$T_{4.8\text{В}} = \frac{\theta^\circ(H)}{352.9} [c]$$

$$T_{6\text{В}} = \frac{\theta^\circ(H)}{461.5} [c]$$

2.5. Моделювання маніпулятора

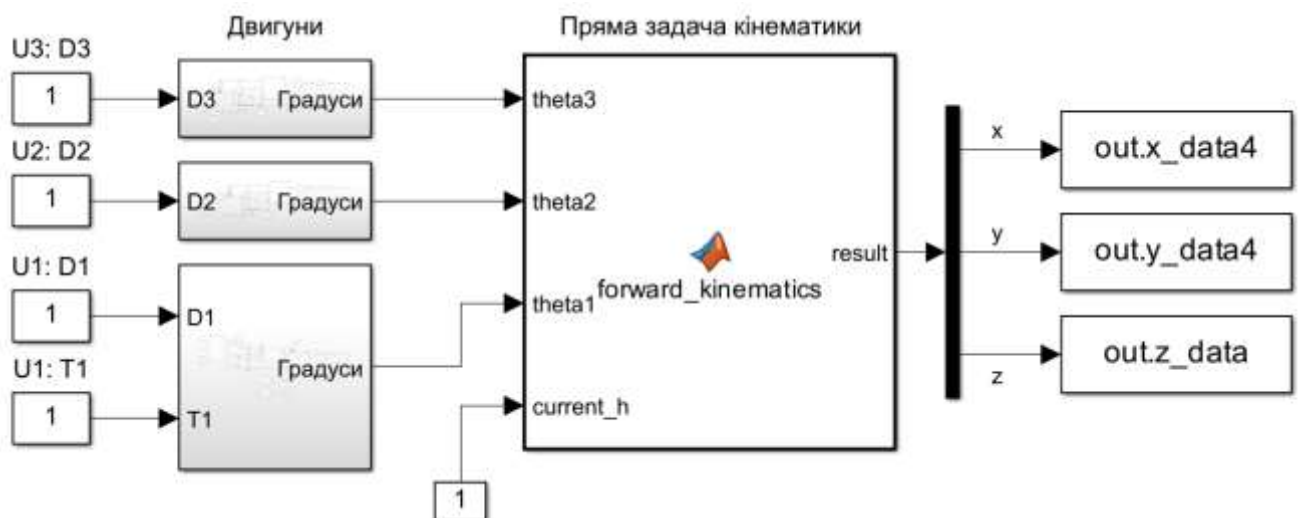


Рисунок 40 – математична модель маніпулятора в середовищі MATLAB Simulink

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Оскільки в експериментальній установці спочатку рухається третя ланка, потім друга, а вже після них перша (вертикальний рух), то використано блоки Transport Delay в середині блоків двигунів.

Вихід двигунів (градуси) подаються на ПЗК, яка за загаданими раніше формулами обраховує вихідні координати при заданих кутах:

```
function result = forward_kinematics(theta3,theta2, theta1, current_h)
    l1 = 14.5;
    l2 = 11.5;
    theta2 = deg2rad(theta2);
    theta3 = deg2rad(theta3);

    x = l1 * cos(theta2) + l2 * cos(pi + theta2 - theta3);
    y = l1 * sin(theta2) + l2 * sin(pi + theta2 - theta3) - 4;

    z = current_h+((25*pi*theta1)/360)/10;
    result = [x; y; z];
end
```

Рисунок 41 – код ПЗК

Траєкторію руху кінцевої точки по кожній координаті окремо, при заданих $D1=5\%$, $T1=0.8949$, $D2=6.56\%$, $D3=9.33$ та нинішній висоті - 15, наведено на рис. 42. Варто зазначити, що система відліку починається із грані другого двигуна, тому початкова точка кінцевого ефектора зміщена.

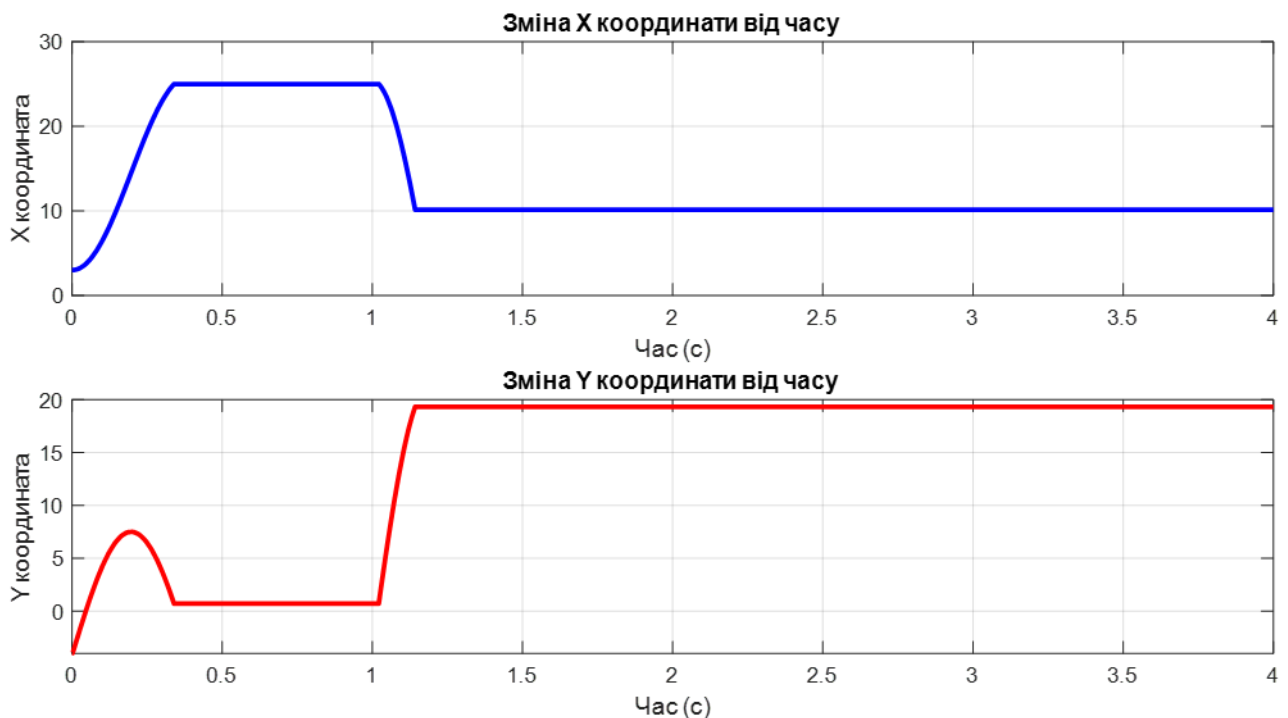


Рисунок 42 – графік зміни координат кінцевого ефектора від часу

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Керування та вихід ланок зображено на рис.43.

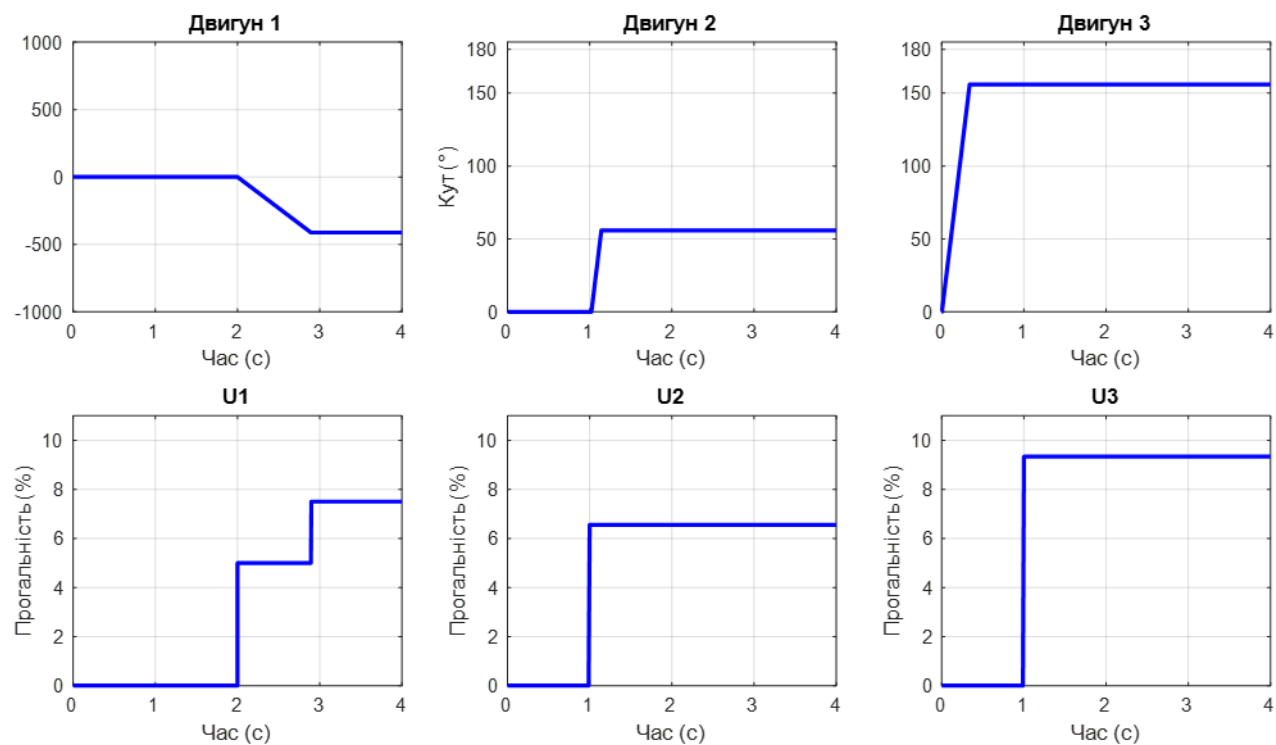


Рисунок 43 – графік керувань та виходів двигунів

Траєкторію руху кінцевої точки на площині наведено на рис. 44.

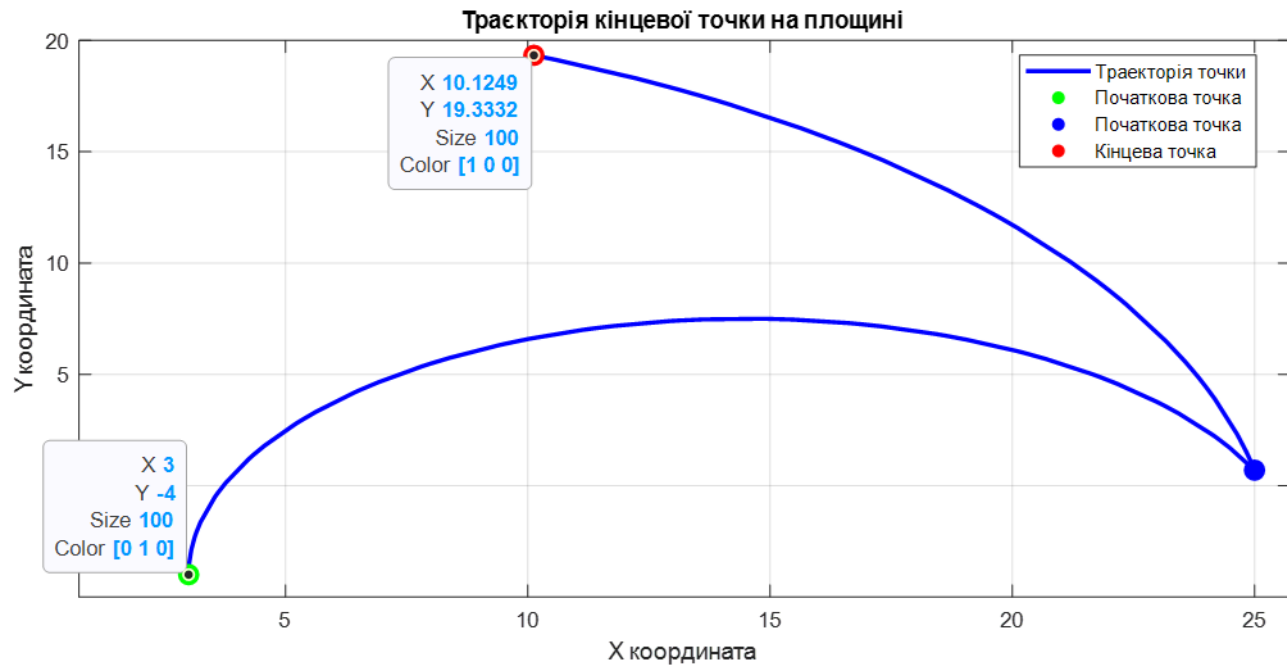


Рисунок 44 – траєкторія кінцевої точки на площині

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

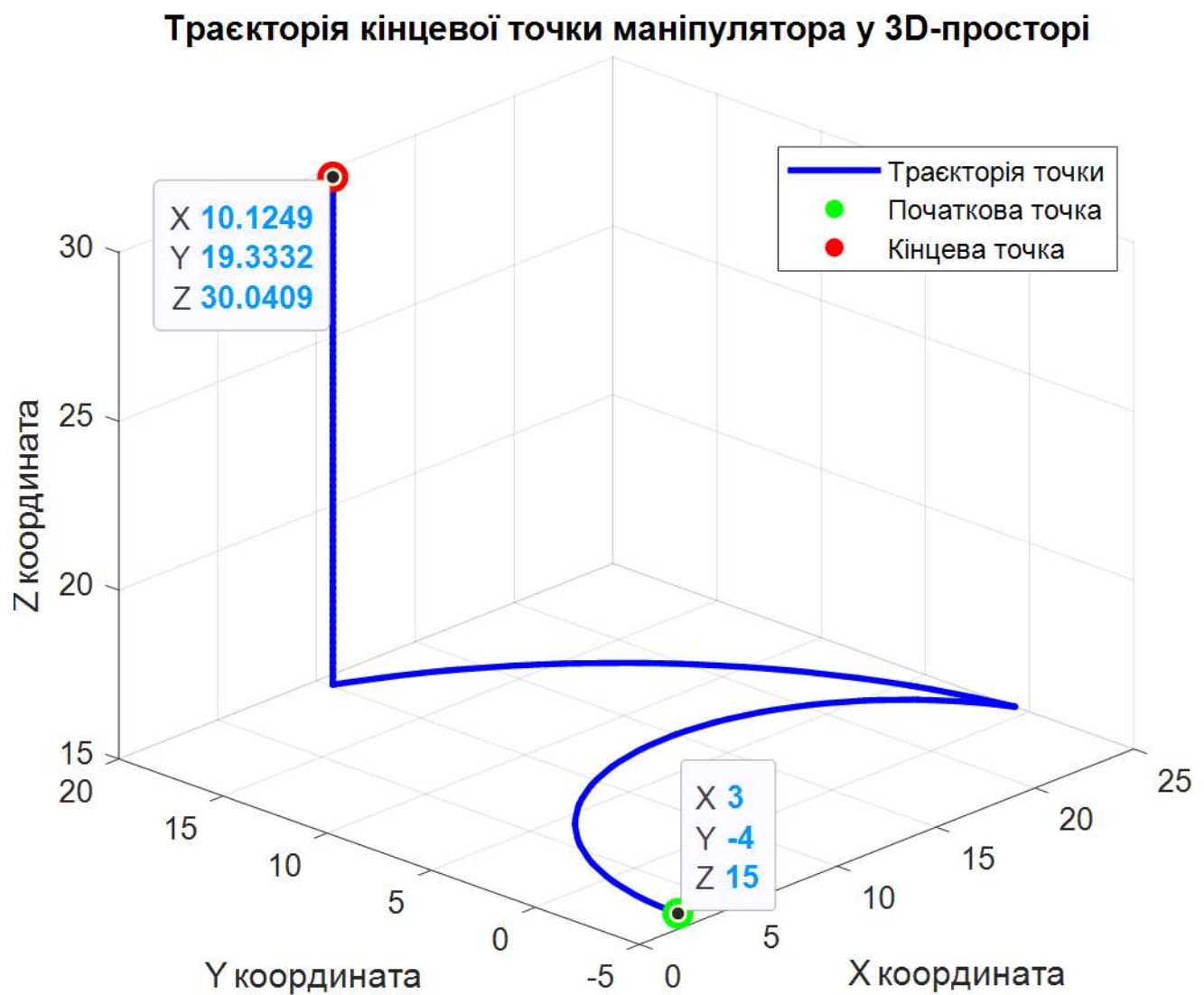


Рисунок 47 – Траєкторія кінцевої точки у просторі

Висновок до розділу 2: виконано моделювання об'єкта керування - робота маніпулятора, який складається з трьох серводвигунів, зокрема двох з обмеженим кутом обертання та одного неперервного, що реалізує вертикальний рух за допомогою зубчастої рейки. Моделювання здійснено у MATLAB Simulink з використанням Simscape. Досліджено динаміку системи.

Розділ 3. Машинний зір

У сучасних системах автоматичного керування все частіше використовуються методи машинного зору – технології, які дозволяють технічним системам необхідним чином інтерпретувати інформацію з камер, або пов'язаних пристроїв. На відміну від класичних сенсорів, машинний зір дає змогу працювати з більш складними середовищами, де присутні кілька об'єктів, фонові шуми, потреба в класифікації, просторовому розпізнаванні тощо.

В якості демонстрації задачі сортування та переміщення об'єктів обрано реалізацію гри в шашки, де переміщення заміняють ходи суперника, а сортування шляхом класифікації належності шашки до відповідного гравця та переміщення її у відповідний контейнер. Камера, закріплена під кутом над маніпулятором, виступає в ролі чутливого елементу та використовується для визначення актуального стану дошки, який в свою чергу приймає участь в створенні автоматичного керування.



Рисунок 48 – Вигляд установки та вид з камери

3.1. Визначення робочої зони

Першочерговим завданням є налаштування процесу фотографування робочої області, після певного періоду часу, або дій зі сторони гравця. Для

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

отримання стану дошки з отриманого зображення, його потрібно розділити на 64 ігрові квадрати. Проте розділення на квадрати вимагає попереднього перетворення над зображенням, для отримання області яку можна програмно розділити на ігрові клітинки, межі яких збігатися зі справжніми.

Визначення ROI відбувається за 4 наперед визначеними координатами точок, які в даній задачі визначають шашкову дошку. Оскільки камера не строго зафіксована та може зміститися під час транспортування, було створено автокалібрування - визначення координат завдяки 4 білим шашкам, розташованими на краях дошки. Кожна з шашок визначається як коло за допомогою алгоритму HoughCircles бібліотеки OpenCV на мові програмування Python.

Метод Хафа часто використовується для виявлення геометричних фігур на зображенні. Його основна ідея базується на переході до пошуку максимуму у параметричному просторі. Кожна точка піксельного простору, яка потенційно належить об'єкту, «голосує» за параметри фігури, які могли б її описати. У результаті всі голоси накопичуються у спеціальній багатовимірній структурі - акумуляторі, а максимум в ньому відповідає найбільш ймовірним фігурам, що присутні на зображенні.

Проте коло має три параметри: координати центру (x, y) та радіус r. Це означає, що необхідно створити тривимірний акумулятор для збереження голосів та для кожної точки проаналізувати всі можливі центри й радіуси, що є дуже затратним по пам'яті та обчислювальних ресурсах. Щоб зробити цей процес придатним до використання в реальному часі, OpenCV реалізує оптимізований варіант методу - Hough Gradient Method. Його ключова відмінність полягає у використанні градієнтної інформації, а саме напрямку зміни яскравості пікселя, який є частиною границі об'єкта. Градієнт дозволяє обмежити область голосування лише напрямком, у якому з великою ймовірністю знаходиться центр кола [32].

Метод працює виключно з одноканальними зображеннями, оскільки він базується на аналізі градієнтів яскравості, а не кольору. Щоб покращити

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

сприйняття контурів та зробити їх яскравішими й контрастнішими, використовується метод вирівнювання гістограми (`cv2.equalizeHist`) [33].

З математичної точки зору, гістограма зображення - це функція, яка показує, скільки пікселів має кожне значення яскравості. У випадку низького контрасту, пікселі часто скупчуються у вузькому діапазоні значень, а метод вирівнювання гістограми розтягує цей діапазон по всьому можливому інтервалу, розподіляючи яскравість пікселів рівномірніше. У результаті - зображення стає більш контрастним, і межі об'єктів стають чіткішими.

Внаслідок вище згаданих операцій можуть з'явитися випадкові шуми, які в результаті можуть створити фальшиві грані, тому їх видалення було здійснено через Гаусове згладження - метод згладжування зображення через згортку з двовимірним Гаусовим ядром. У загальному випадку згладжування є різновидом просторової фільтрації, що полягає у згортці зображення з низькочастотним (low-pass) фільтром. Ідея полягає в тому, щоб згладити різкі локальні зміни яскравості, які не характерні для справжніх об'єктів, але можуть з'явитися через шум або текстуру поверхні. Це досягається шляхом того, що кожен піксель зображення замінюється на середньозважене значення яскравості сусідніх пікселів. На відміну від простого усереднення, у Гаусовому фільтрі ядро формується за нормальним розподілом, що дозволяє ефективно прибрати шум, при цьому зберігаючи основну геометрію об'єктів. В OpenCV Гаусове згладжування виконується за допомогою функції `cv2.GaussianBlur()`, якій задаються зображення та розмір ядра [34].

Це створює ідеальні умови для виявлення круглих об'єктів методом Хафа, оскільки алгоритм працює точніше.

Після виявлення кіл їх колір перевіряється шляхом обчислення середнього значення пікселів у межах кола. Якщо воно перевищує поріг, вважається, що це біла шапка.

Далі координати фільтруються та класифікуються за квадрантами зображення: верхній лівий, нижній лівий, верхній правий, нижній правий. Це

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

дозволяє коректно ідентифікувати порядок точок для подальшої трансформації.

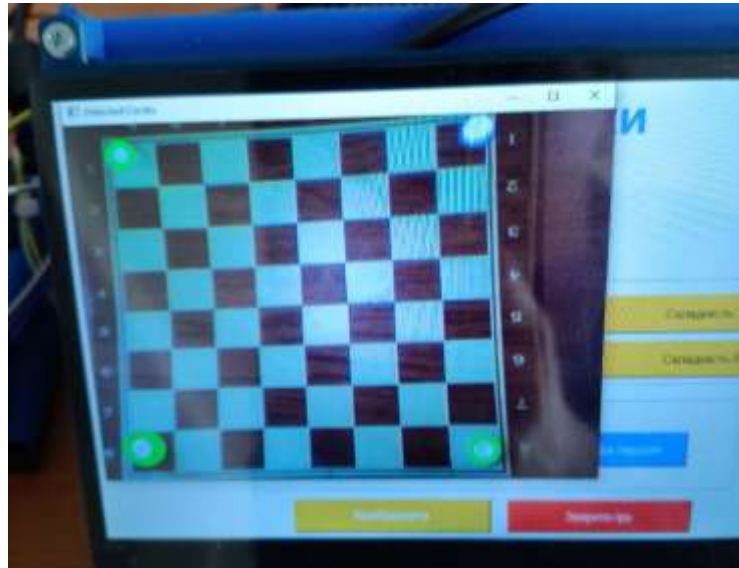


Рисунок 49 – процес калібрування

3.2. Корекція перспективи

Завдяки чотирьом точкам, отриманими після автокалібрування, здійснюється вирівнювання перспективи (гомографія), яке дозволяє не просто обрізати зображення до ROI, після чого залишаються фонові елементи, а повністю залишити тільки необхідну зону та забезпечити однаковий розмір кожної клітинки при поділі дошки на 64 квадрати.

Математично знаходження нових координат відбувається шляхом множення матриці гомографії на матрицю початкових координат:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{pmatrix} = H \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

де w' – масштабний коефіцієнт, який перетворює точку з однорідного (проективного) простору в 2D простір. Тоді система рівнянь для кожної точки:

$$\begin{cases} x_i' = \frac{h_{11}x_i + h_{12}y_i + h_{13}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}} \\ y_i' = \frac{h_{21}x_i + h_{22}y_i + h_{23}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}} \end{cases}$$

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Тобто для кожної пари точок $P_i = (x_i, y_i)$ та їх відповідних проєкцій у перетвореному зображенні $P'_i = (x'_i, y'_i)$ отримується два рівняння із 8 невідомих (дев'ятий коефіцієнт фіксований). Отже щоб знайти розв'язок цього рівняння необхідно 4 точки, які в результаті створюють 8 лінійних рівнянь. Після чого отримана система розв'язується та знаходяться всі коефіцієнти матриці H . Потім ми перебираємо кожен піксель вихідного зображення шляхом множення на зворотну матрицю H^{-1} щоб отримати відповідну точку в оригінальному зображенні.

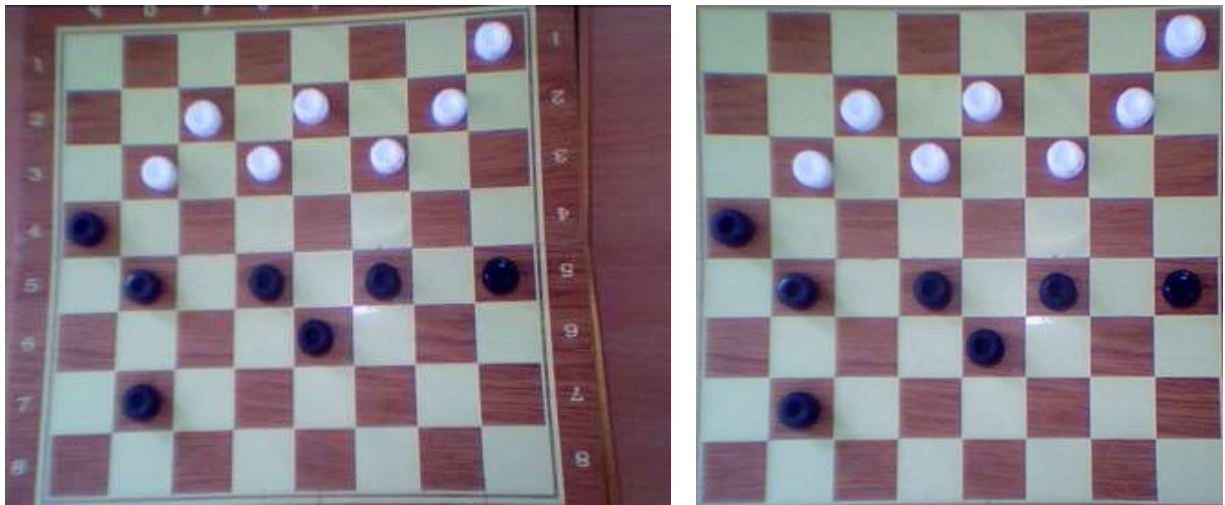


Рисунок 50 – Оригінальне та трансформоване зображення

3.3. Класифікація об'єктів за кольором

Після того як зображення було вирівняне за допомогою гомографічного перетворення, отримана ігрова дошка набуває строго квадратної форми, що дозволяє програмно поділити її на 64 рівні клітинки. Кожна клітинка тепер відповідає конкретній позиції в матриці стану гри, і її вміст може бути проаналізовано окремо. Наступним етапом є визначення, чи присутній в клітинці об'єкт (шашка), і якщо так, то до якого гравця він належить.

Для виявлення об'єктів у кожній клітинці повторно використовується метод `cv2.HoughCircles`, який дозволяє виявити круглу форму фігури. Якщо у межах клітинки знайдено коло, то алгоритм переходить до етапу класифікації її кольору. Для визначення кольору було використано метод порогової

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

класифікації, який у даному випадку базується на аналізі середнього значення кольору пікселів усередині знайденого кола. Розрахунок середнього кольору дозволяє зменшити вплив локальних варіацій яскравості, тіней або неідеального освітлення. Отримане значення порівнюється з наперед заданими діапазонами, що відповідають чорним або білим шашкам. Якщо всі компоненти кольору знаходяться у нижньому пороговому діапазоні об'єкт вважається чорним, якщо навпаки, тоді білим. Таким чином, класифікація за кольором завершує процес візуального аналізу дошки: кожна клітинка або залишається порожньою, або містить шашку певного гравця, і це дозволяє сформувати оновлену матрицю стану гри для наступних алгоритмів.

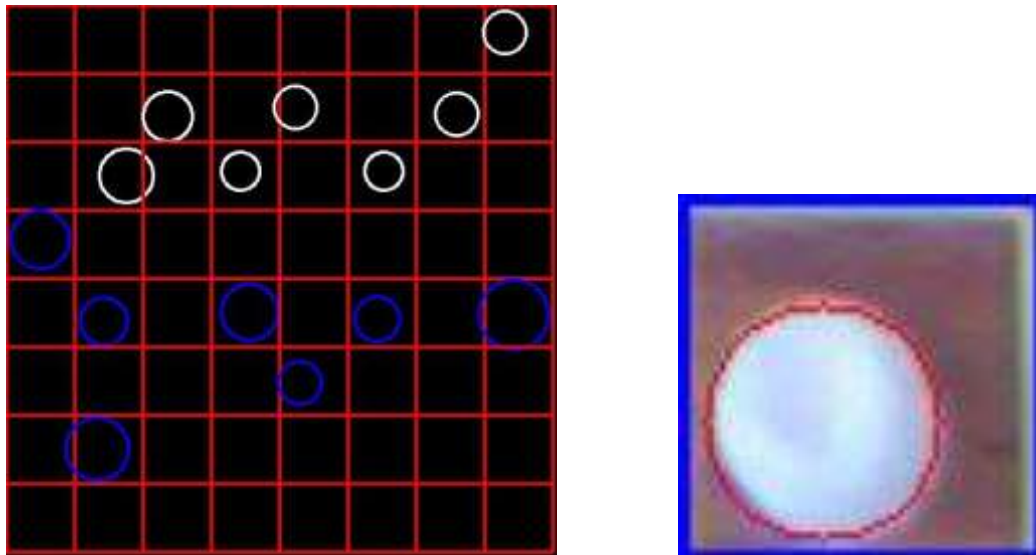


Рисунок 51 – визначення та класифікація шашок на дошці

Висновок до розділу 3: У розділі було реалізовано систему машинного зору, що виконує автоматичне виявлення ігрової дошки, визначення позицій шашок та їх класифікацію за кольором. Для цього застосовано метод HoughCircles з попередньою обробкою зображення: перетворенням у одноканальне зображення, вирівнюванням гістограми та згладжуванням. Подальша гомографія дозволила поділити дошку на 64 клітинки з рівними розмірами.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Після визначення стану ігрової дошки за допомогою системи машинного зору, наступним етапом є формування керуючих дій для об'єкта керування. Суть керування у даному випадку полягає в точному досягненні заданих просторових координат захватним пристроєм. В якості регулятора використовується програмне керування через кінематичну модель, яка обчислює потрібні кути обертання серводвигунів для досягнення завдання.

Функціонально керування реалізується на базі міні-комп'ютера LattePanda Alpha, який об'єднує обчислювальні ресурси повноцінного ПК з можливістю апаратного управління через вбудований Arduino Leonardo.

4.1. Автоматичне визначення завдання

У випадку імітації гри в шашки завдання для робота залежить від поточного стану дошки та постійно змінюється при переміщені будь-яких шашок, звідси постає завдання автоматично визначити координати тіла на дошці. Через обмеження експериментальної установки та однакову висоту всіх об'єктів, z координата завдання змінюється у двох наперед заданих значеннях висоти.

Після застосування гомографії та поділу дошки на 64 квадрати, її можна представити у вигляді індексованої матриці, де елементи матриці це відповідні клітинки дошки. Залежно від ігрових умов виконується мінімакс алгоритм із альфа -бета відсіченням, який визначає індекси позиції з якої та куди потрібно зробити хід.

Алгоритм мінімакс є класичним методом прийняття рішень у повністю детермінованих іграх із двома гравцями та з нульовою сумою, таких як шахи, шашки або хрестики-нулики. Його основна мета - знайти оптимальну стратегію дій, яка гарантує найкращий можливий результат для гравця, незалежно від дій супротивника, який також грає оптимально.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Принцип дії мінімаксу полягає в побудові дерева рішень, у якому кожна вершина представляє певний стан гри, а кожне ребро - можливий хід. Рівні дерева відповідають черговості гравців: максимізуючий гравець прагне збільшити свій виграш, мінімізуючий - зменшити його. Алгоритм працює рекурсивно, на кожному рівні обираючи найкраще можливе значення оцінки залежно від ролі гравця (max або min), після чого це значення передається на попередній рівень. Таким чином, у кореневій вершині дерева отримується найкращий хід із точки зору максимізуючого гравця, який і виконується.

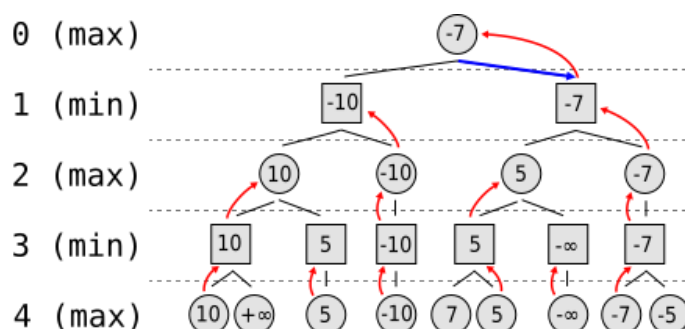


Рисунок 52 – Візуалізація мінімакс алгоритму [35]

У задачах з великою кількістю можливих ходів, глибина дерева пошуку може призводити до комбінаторного вибуху – різкого зростання часової складності [36]. Кількість можливих позицій, які потрібно оцінити, росте експоненційно з глибиною, у грі в шашки оцінюється, що повне ігрове дерево може містити понад 10^{40} можливих станів, що робить повний перебір нереалістичним. Тому використовуються обмеження на глибину пошуку, фіксовані часові рамки або адаптивна стратегія на основі динамічної складності позиції.

Для оцінки кожного стану гри використовується евристична функція, яка кількісно відображає користь позиції. У найпростішому випадку вона базується на кількості шашок кожного гравця, їх типі (звичайна або дамка), позиційній перевазі тощо. Ця функція не гарантує правильність, але дозволяє відносно точно оцінити ймовірність виграшу з даної позиції, що є достатнім для практичного застосування.

Щоб зменшити обсяг обчислень без втрати точності, алгоритм доповнюється механізмом альфа-бета відсікання. Суть цього підходу полягає

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

у відмові від розгляду гілок дерева, які не можуть вплинути на остаточне рішення. Під час рекурсивного обходу зберігаються дві змінні:

- альфа - найкраще знайдене значення для максимізуючого гравця на поточному шляху;
- бета - найкраще значення для мінімізуючого гравця.

Якщо в певний момент з'ясовується, що поточне значення не перевершує вже знайденого у попередніх гілках (тобто $\beta \leq \alpha$), то подальша перевірка цієї гілки припиняється. Це не впливає на правильність результату, але дозволяє значно зменшити кількість оцінених вузлів.

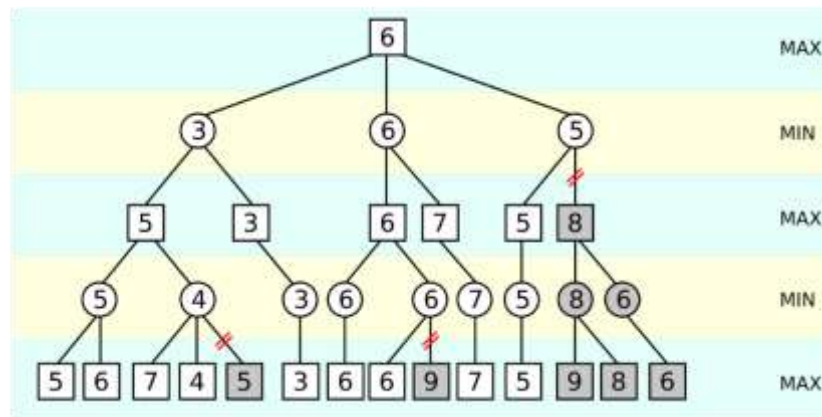


Рисунок 53 – Візуалізація мінімакс алгоритму з альфа-бета відсіченням [37]

Програма на основі цього алгоритму повертає індекси клітинок звідки та куди потрібно перемістити об'єкт. Отримані індекси, за відомими розмірами зображення, перетворюються в пікселі. Розраховані координати в пікселях масштабуються до реальних розмірів у сантиметрах на основі співвідношення роздільної здатності зображення до фізичних габаритів ігрового поля. Це відбувається шляхом спочатку множення на довжину сторони реального ігрового квадрата - 2.5 см., а потім додавання до отриманих значень зміщень центрів, шляхом знаходження довжини 1 пікселя із даних: розмір дошки в пікселях 480x480, дошка поділена на 8 рядків та стовпців, звідси довжина одного квадрату $480/8 = 60\text{px}$, і відповідно 1 піксель в сантиметрах $= 2.5/60 = 0.0416666667$.

Також враховуючи зміщення полюса та фізичні обмеження робота, завдання отримуються наступним чином:

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

```

position_x = position_x*2.5+center[0]*0.0416666667-14
position_y = 20 - position_y*2.5-center[1]*0.0416666667
position_x2 = position_x2*2.5+30*0.0416666667-14
position_y2 = 20 - position_y2*2.5-30*0.0416666667

```

4.2. Зворотна задача кінематики

Після автоматичного формування координат точки призначення, отриманих з ігрової логіки та конвертованих у реальні розміри робочої зони, виникає необхідність забезпечити точне позиціювання захватного пристрою маніпулятора у вказаній точці. Оскільки кожен сервопривід керує певною ланкою механічної конструкції, а кінцева позиція залежить від комбінації їх кутів, постає завдання визначити ці кути. Це завдання називається зворотною задачею кінематики (ЗЗК). На відміну від прямої задачі, де за відомими кутами обертання розраховується положення кінцевого ефектора маніпулятора, зворотна задача виконує обернену операцію - знаходить необхідні кути повороту приводів для досягнення заданих координат.

Для звичайних серводвигунів вона розраховувалася шляхом перебору всіх можливих комбінацій кутів, які подавалися у ПЗК та розрахунку похибки між завданням та отриманими координатами, кути які дають найменшу похибку зберігаються:

```

function [theta3, theta2, t, dc_z] = inverse_kinematics(x,y,z, current_h)
    l1 = 14.5;
    l2 = 11.5;
    closest_angles = [0; 0];
    closest_distance = inf;
    for ang2 = 1:1:180
        for ang3 = 1:1:180
            theta2 = deg2rad(ang2);
            theta3 = deg2rad(ang3);
            x_out = l1 * cos(theta2) + l2 * cos(pi + theta2 - theta3);
            y_out = l1 * sin(theta2) + l2 * sin(pi + theta2 - theta3) - 4;
            distance = sqrt((x_out - x) ^ 2 + (y_out - y) ^ 2);
            if distance < closest_distance
                closest_distance = distance;
                closest_angles = [ang2+3; ang3+7];
            end
        end
    end
end

```

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

```

end
end
theta2 = closest_angles(1);
theta3 = closest_angles(2);

```

Рисунок 54 – ЗЗК

4.3. Синтез системи

Після визначення просторового завдання для маніпулятора та реалізації зворотної задачі кінематики (ЗЗК), необхідно реалізувати повний цикл формування керуючого впливу. На цьому етапі формується логіка взаємодії між функціональними блоками системи, яка забезпечує фізичний рух виконавчих механізмів відповідно до розрахованих параметрів.

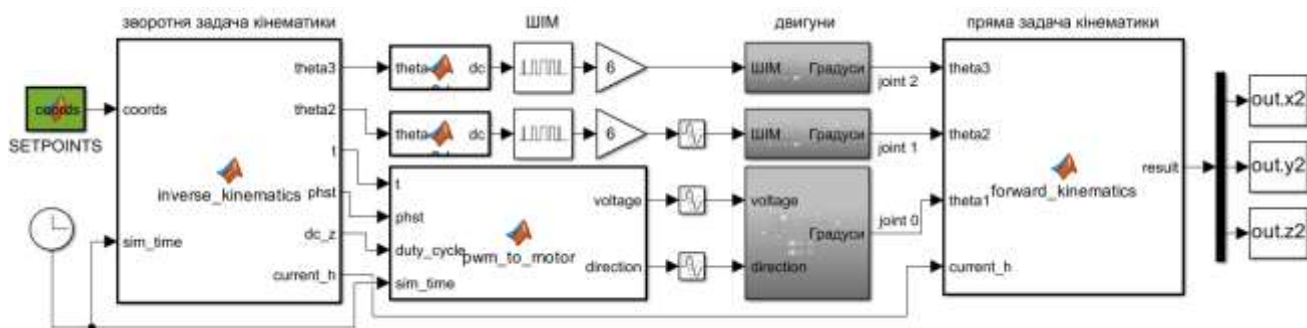


Рисунок 55 – Модель автоматичної системи керування

У функції SETPOINTS автоматично визначається завдання через раніше згадані перетворення та подається на функцію ЗЗК після чого вихід функції - кути повороту, перетворюються у прогальність та подаються на блок PWM (ШИМ), звідки подаються на відповідні двигуни. Керування t та dc_z подаються на функцію `pwm_to_motor`, яка відповідно до вхідної прогальності перетворює її у напругу та визначає напрямок обертання для двигуна (див 2.3.2). Додатково функція приймає час симуляції від блоку Clock для припинення живлення після заданого часу керування t .

Оскільки в експериментальній установці спочатку рухається третя ланка, потім друга, а вже після них перша (вертикальний рух), то використано блоки Transport Delay.

Вихід двигунів (градуси) подаються на ПЗК, яка за загаданими раніше формулами обраховує вихідні координати при заданих кутах.

Траєкторія руху точки у просторі при завданні перемістити шашку із клітинки (1, 1) до клітинки (4, 6) зображено на рис. 56. Варто зазначити що індексація шашкової доки починається з лівого верхнього кута (відносно погляду зі сторони маніпулятора) та нульового індексу.

3D траєкторії та переміщення шашки

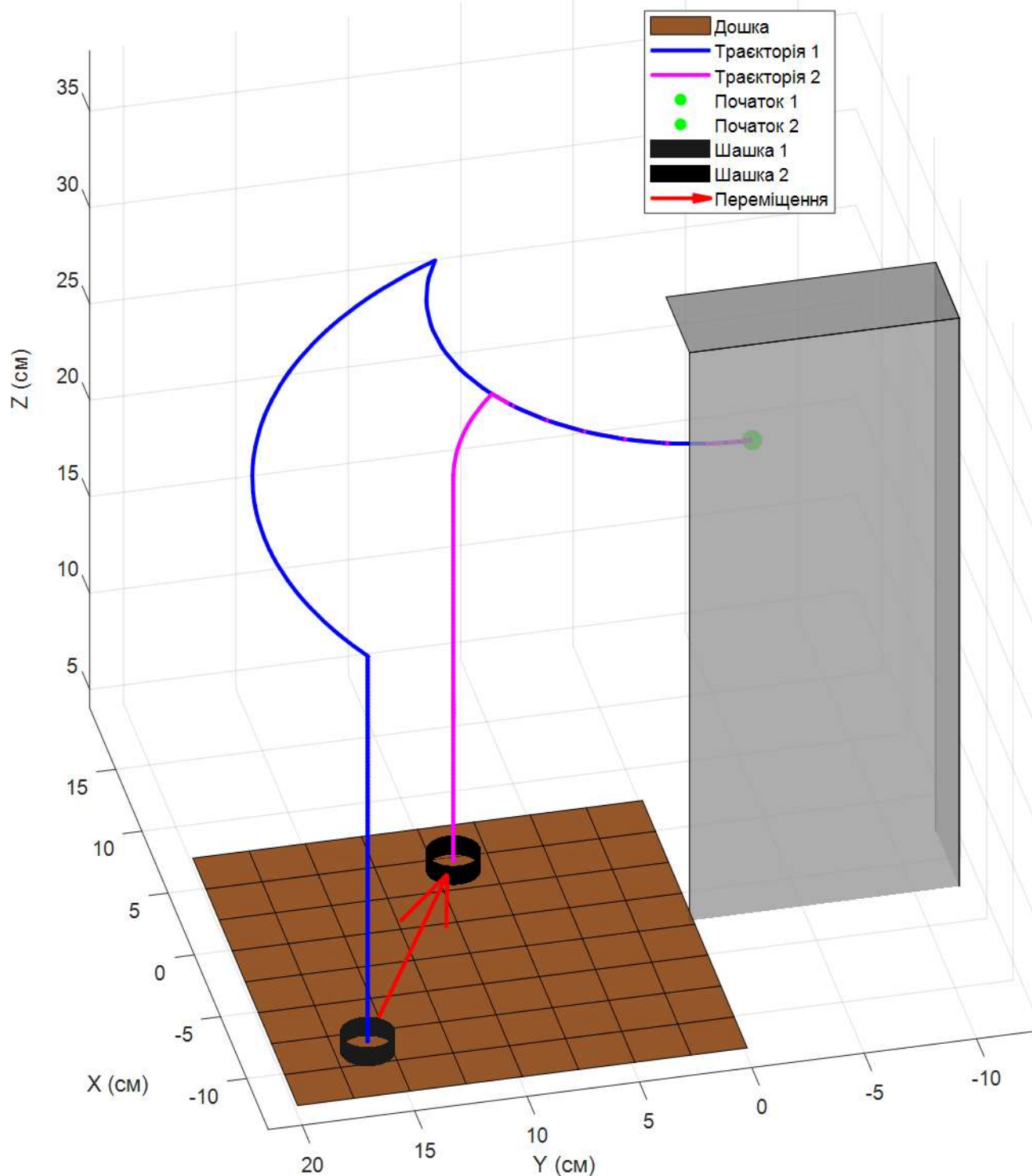


Рисунок 56 – траєкторія переміщення шашки в просторі

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ДПЛА12.04.00.000ПЗ

Арк.

46

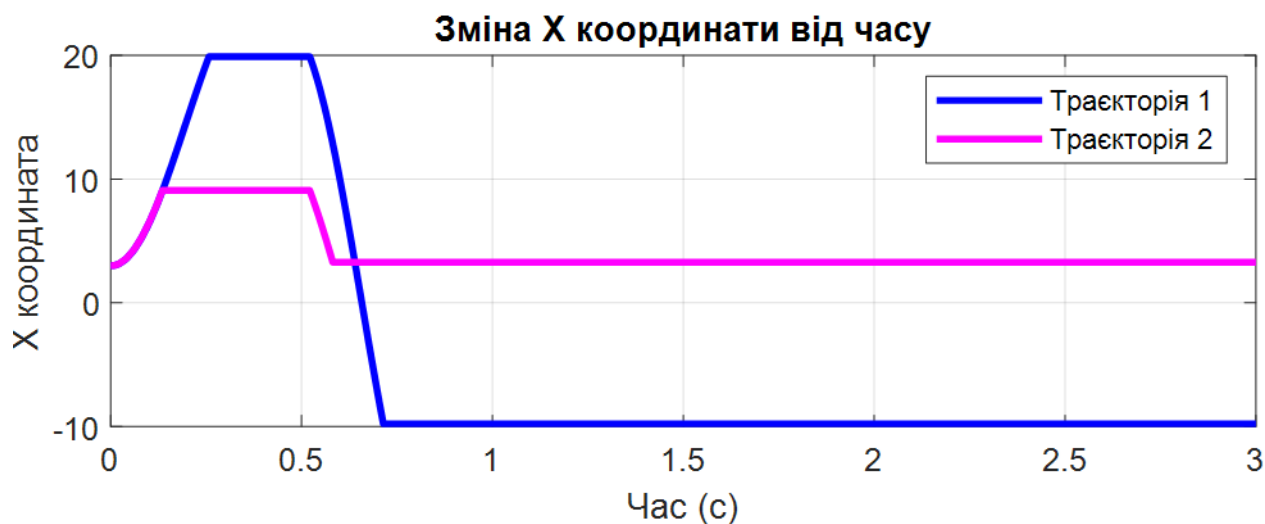


Рисунок 57 – зміна X координати в просторі

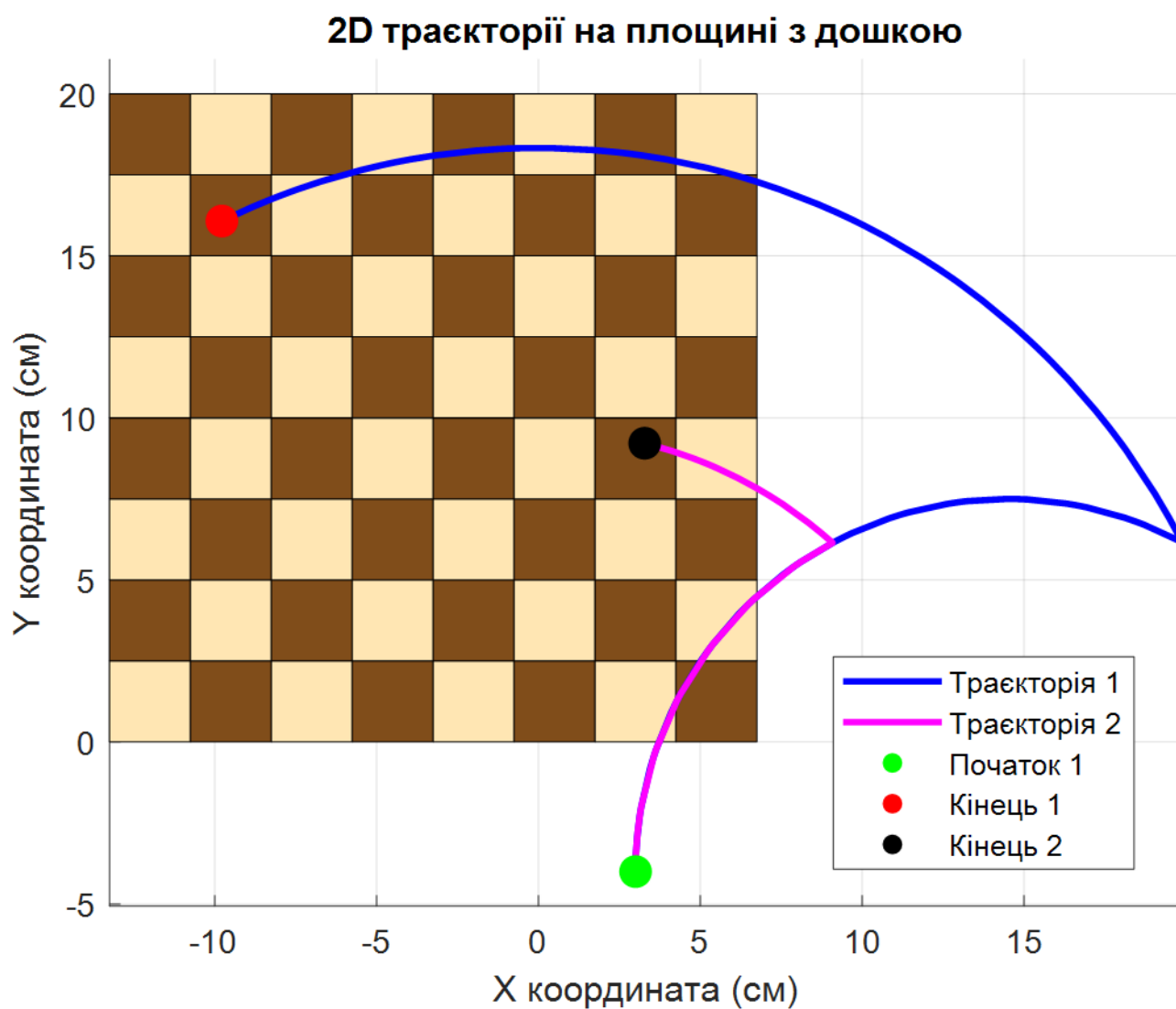


Рисунок 58 – траєкторія переміщення шашки на площині

4.4. Ручне керування

Обраний раніше мінікомп'ютер має декілька варіантів підключення екрана, що дозволяє використовувати як зовнішні монітори, так і сенсорні панелі на основі інтерфейсу eDP (Embedded DisplayPort). Обраний дисплей MiiEIAOD 12.5 inch 4K IPS Touch Display є універсальним дисплеєм, який має вбудовану сенсорну панель, підтримує 4K відео через HDMI або Type-C та сумісний із системами типу LattePanda, Raspberry Pi. Він працює через стандартні зовнішні інтерфейси та не потребує тонких шлейфів чи спеціалізованих драйверів для ініціалізації екрана та сенсора, як в eDP.

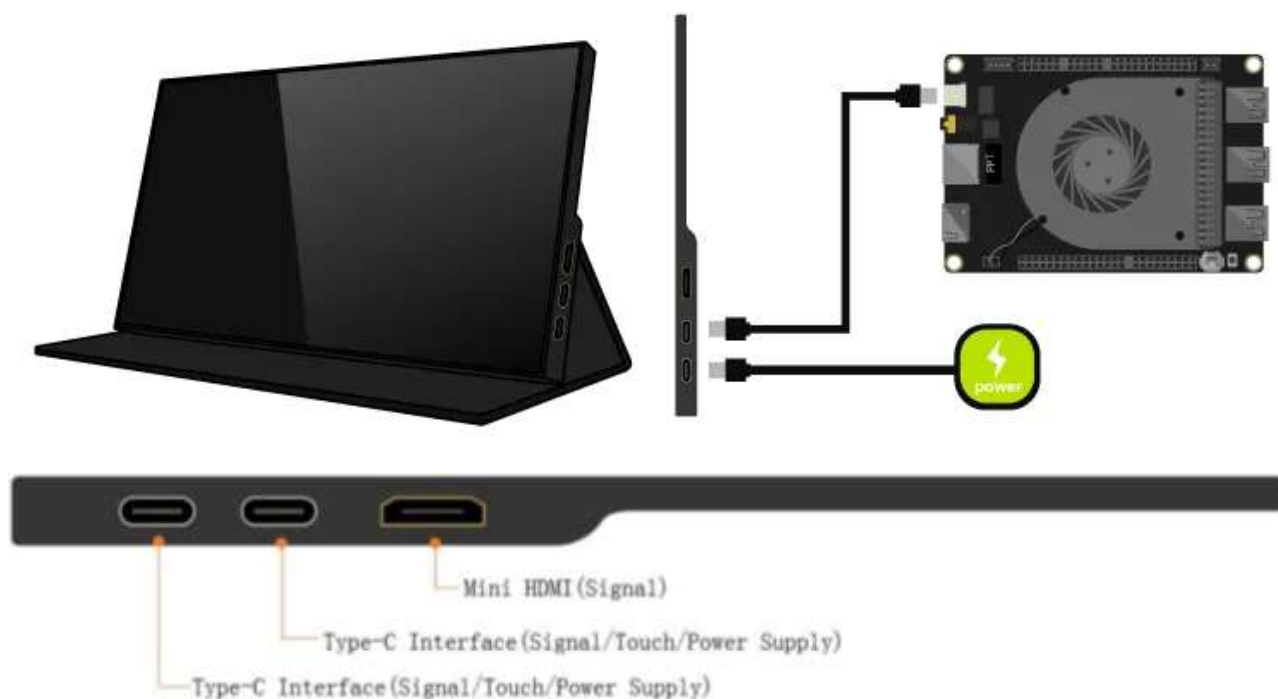


Рисунок 59 – обраний дисплей [38]

Графічний інтерфейс користувача, адаптований під ручне керування у повноекранному режимі, реалізовано з використанням бібліотеки Tkinter (Python). Початком взаємодії є стартове меню, в якому користувач визначає ключові параметри гри до її запуску – рівень складності, початкового гравця та обов'язковість бою. Також додана кнопка для виклику режиму калібрування, який дозволяє задати робочу область визначення фігур шляхом калібрування згаданого у розділі 3.1.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

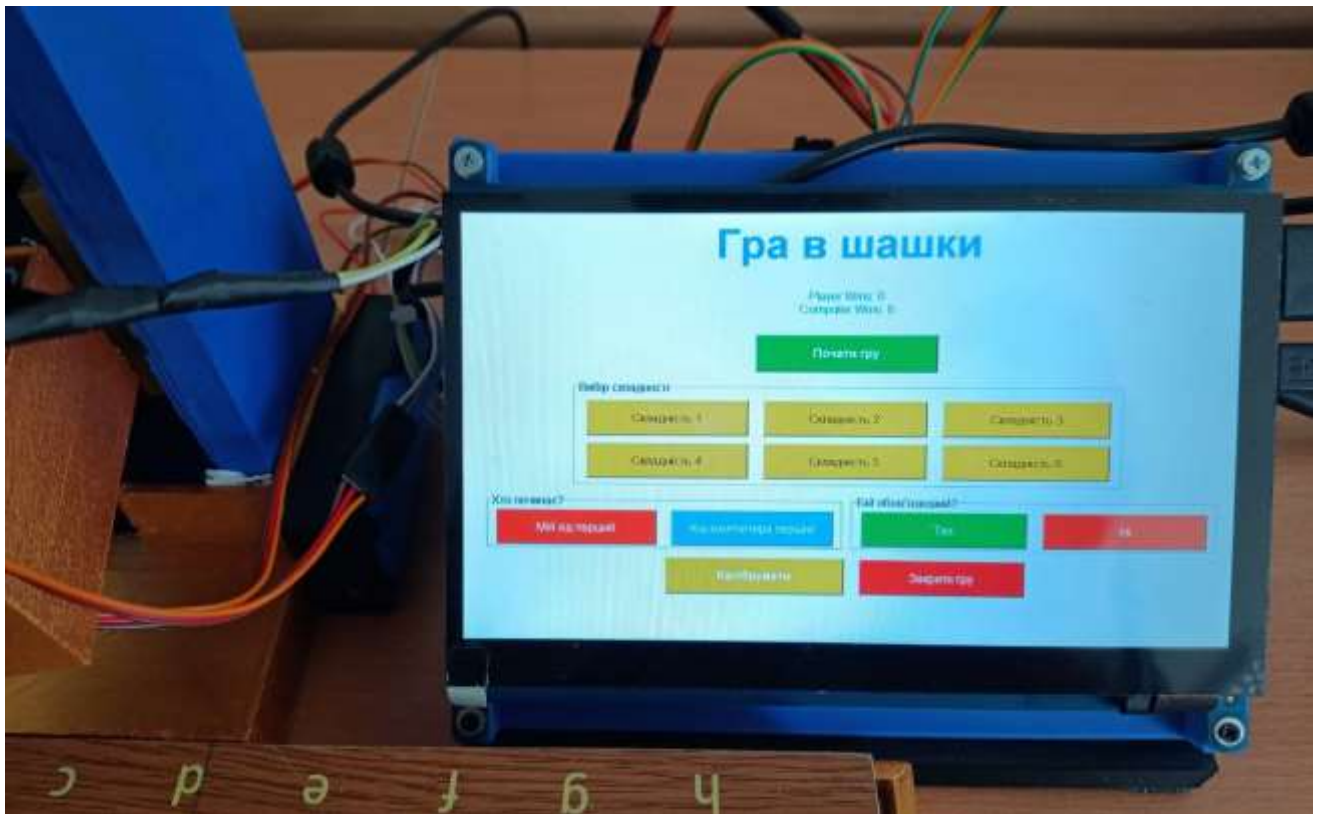


Рисунок 60 – вигляд інтерфейсу на дисплеї

Після запуску гри інтерфейс автоматично змінює структуру, фокусуючись на процесі гри. Користувач бачить поточний статус, має змогу зробити хід, а також завершити гру вручну. Якщо першим грає комп'ютер, його хід виконується автоматично з невеликою затримкою.

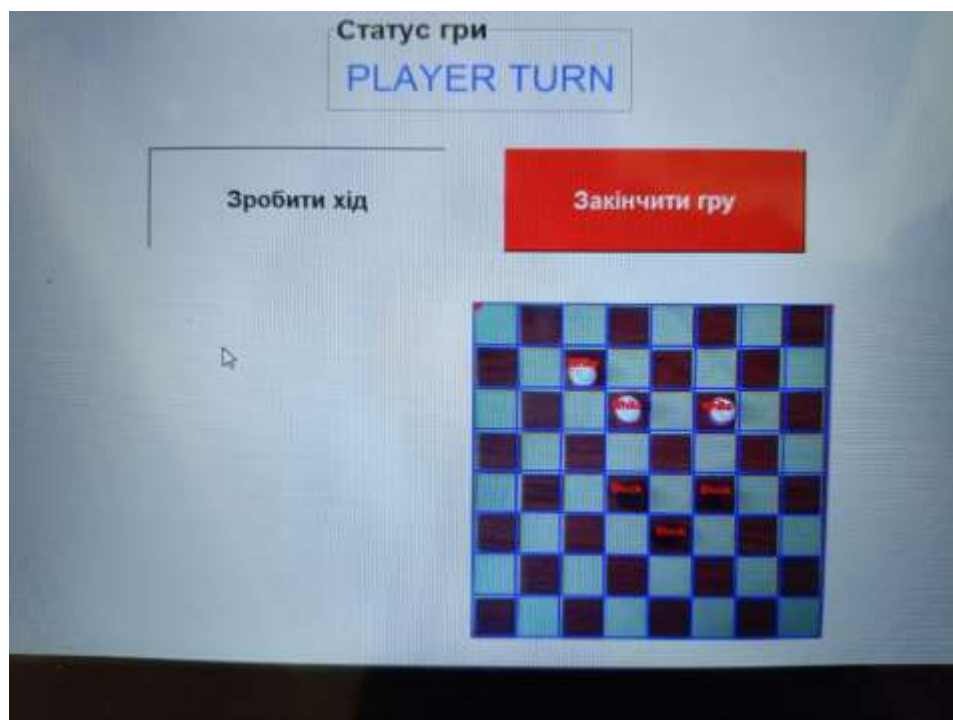


Рисунок 61 – вигляд інтерфейсу керування процесом гри

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

З метою підвищення інтерактивності під час періодів бездіяльності запускається анімоване роботизоване обличчя. Як тільки користувач не взаємодіє із системою протягом певного часу, автоматично запускається спеціальне анімоване вікно, яке розгортається на весь екран. У цьому вікні відображається стилізоване обличчя, яке складається з двох очей і рота, що динамічно змінюють форму. Очі реалізовано у вигляді полігонів, кожен з яких формується чотирма точками. Вони поступово змінюють свої координати, за допомогою алгоритму лінійної інтерполяції над координатами, створюючи плавний ефект моргання, погляду в різні сторони та інших емоційних виразів. Ці вирази змінюються циклічно, створюючи враження живого цифрового персонажа. Рот у вигляді набору тонких вертикальних прямокутників коливається у висоту за допомогою випадкових відхилень.

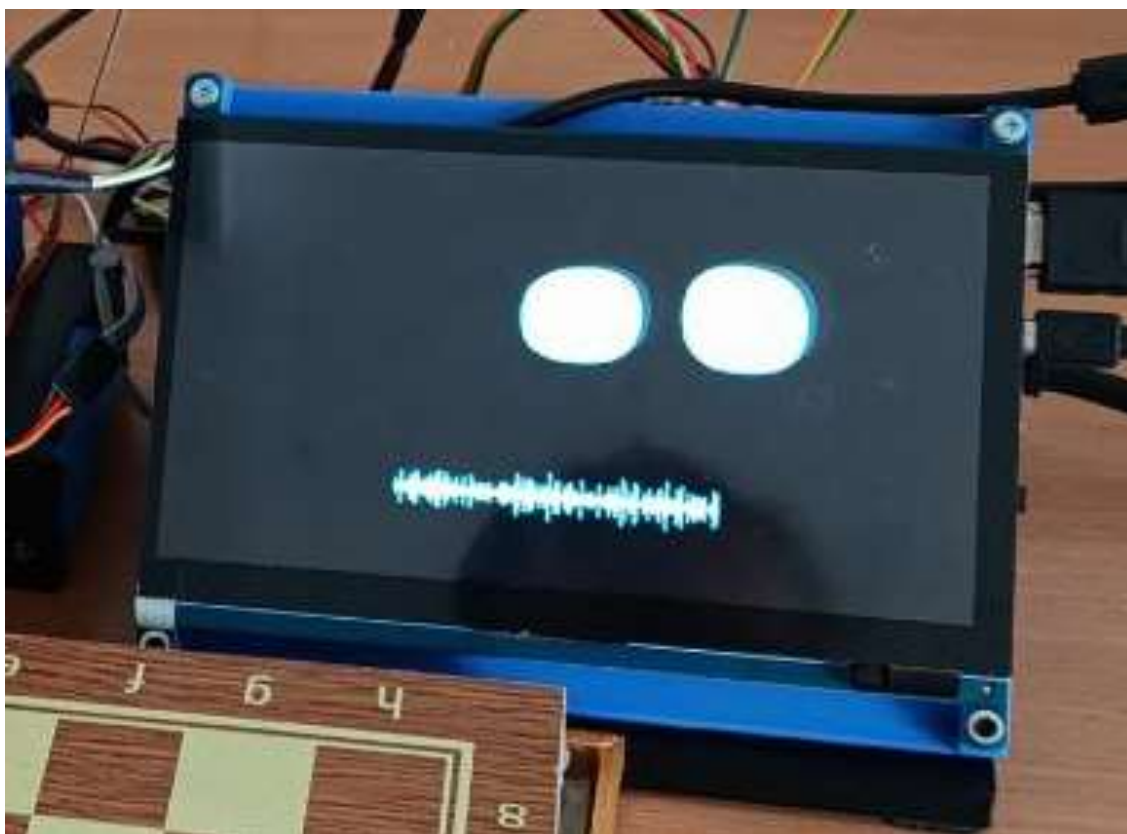


Рисунок 62 – вигляд роботизованого обличчя на дисплеї

Також було додано можливість ручного керування двигунами та електромагнітом через локальний вебсервер розгорнутий за допомогою фреймворку Flask.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

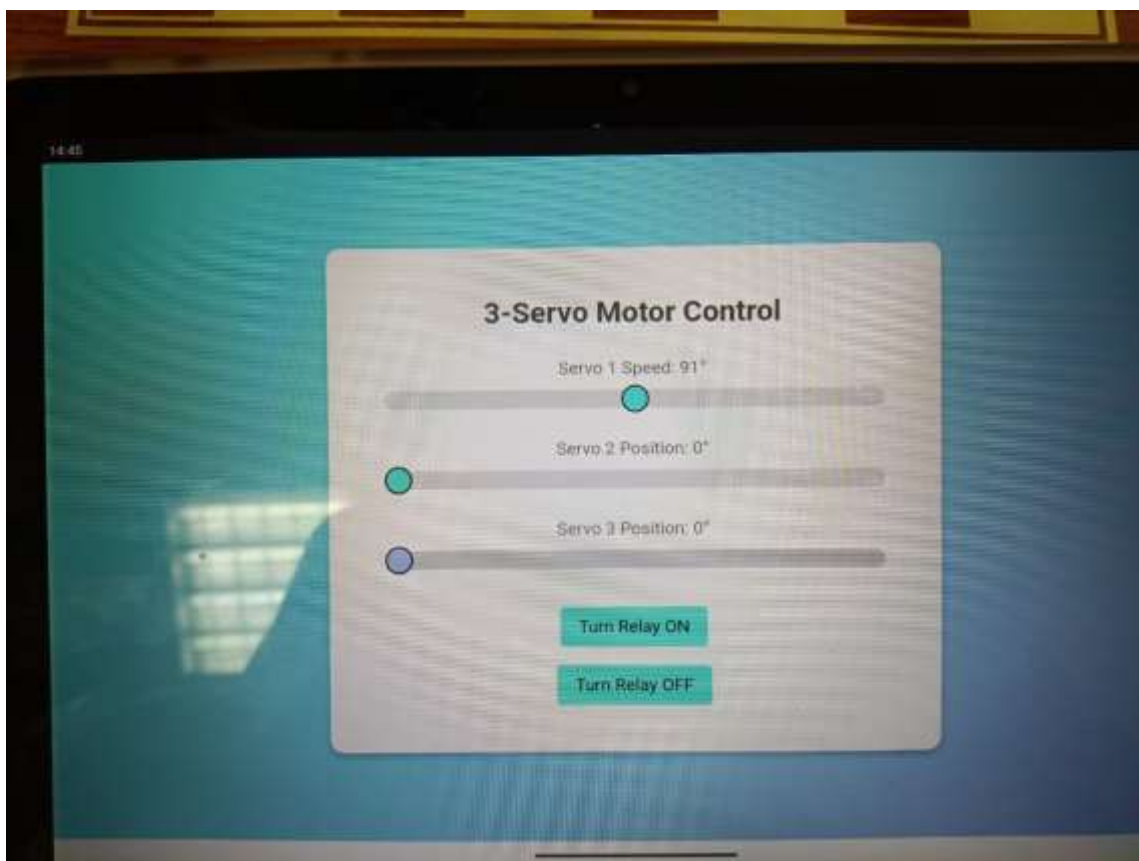


Рисунок 63 – вигляд вебінтерфейсу

Висновок до розділу 4: виконано повний синтез системи керування роботизованим маніпулятором. На основі даних із камери сформовано координати захоплення та переміщення об'єкта за допомогою алгоритму мінімакс із альфа-бета відсіченням, що забезпечує прийняття оптимальних рішень у грі. Визначення координат виконано з урахуванням геометрії ігрового поля та масштабування з пікселів у реальні величини, що дозволило сформувати просторове завдання. Інтегровано систему візуального інтерфейсу з ручним керуванням, дисплеєм та веб-доступом.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ

Основою автоматичної, роботизованої системи сортування та переміщення об'єктів є робот маніпулятор та конвеєр. Відеокамера (позиція 1) встановлена над технологічною зоною та виконує неперервне зчитування та передачу візуальної інформації до мінікомп'ютера для аналізу. На основі візуального контролю виявляється положення об'єкта на конвеєрній стрічці (позиція 4) та формується завдання для робота маніпулятора (позиція 2).

Робот маніпулятор складається з трьох ланок і 3 приводів (позиції 7-9) які забезпечують точне позиціонування кінцевого ефектора - електромагніта (позиція 3).

За рух конвеєрної стрічки відповідає двигун (позиція 6). Для безпечної роботи конвеєр оснащено датчиком відхилення стрічки (позиція 5), який контролює поперечні коливання.

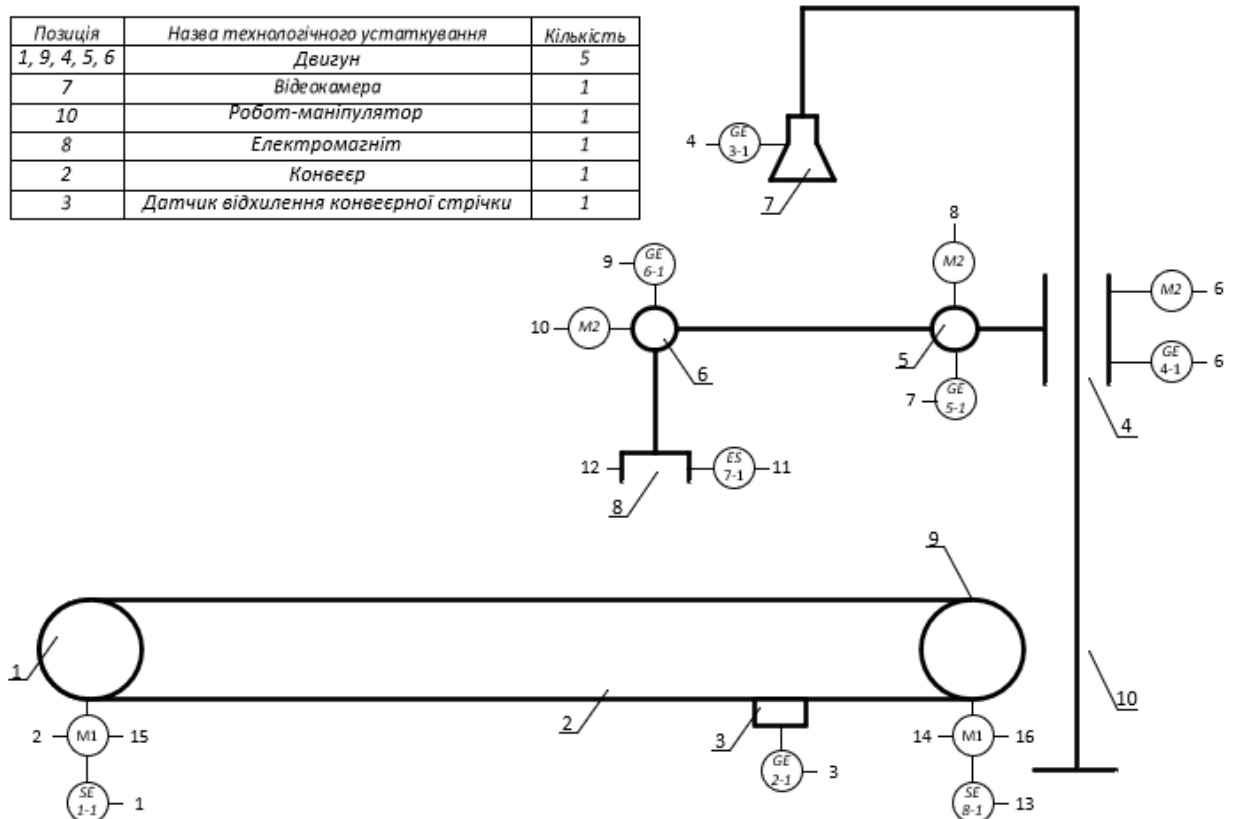


Рисунок 64 – схема технологічного процесу

5.1. Розробка функціональної схеми керування

Процес сортування та переміщення об'єктів вимагає точного позиціонування та дотримування технологічних параметрів елементів цього процесу. Для вирішення цього завдання було впроваджено засоби автоматизації проілюстровані на рис. 65.

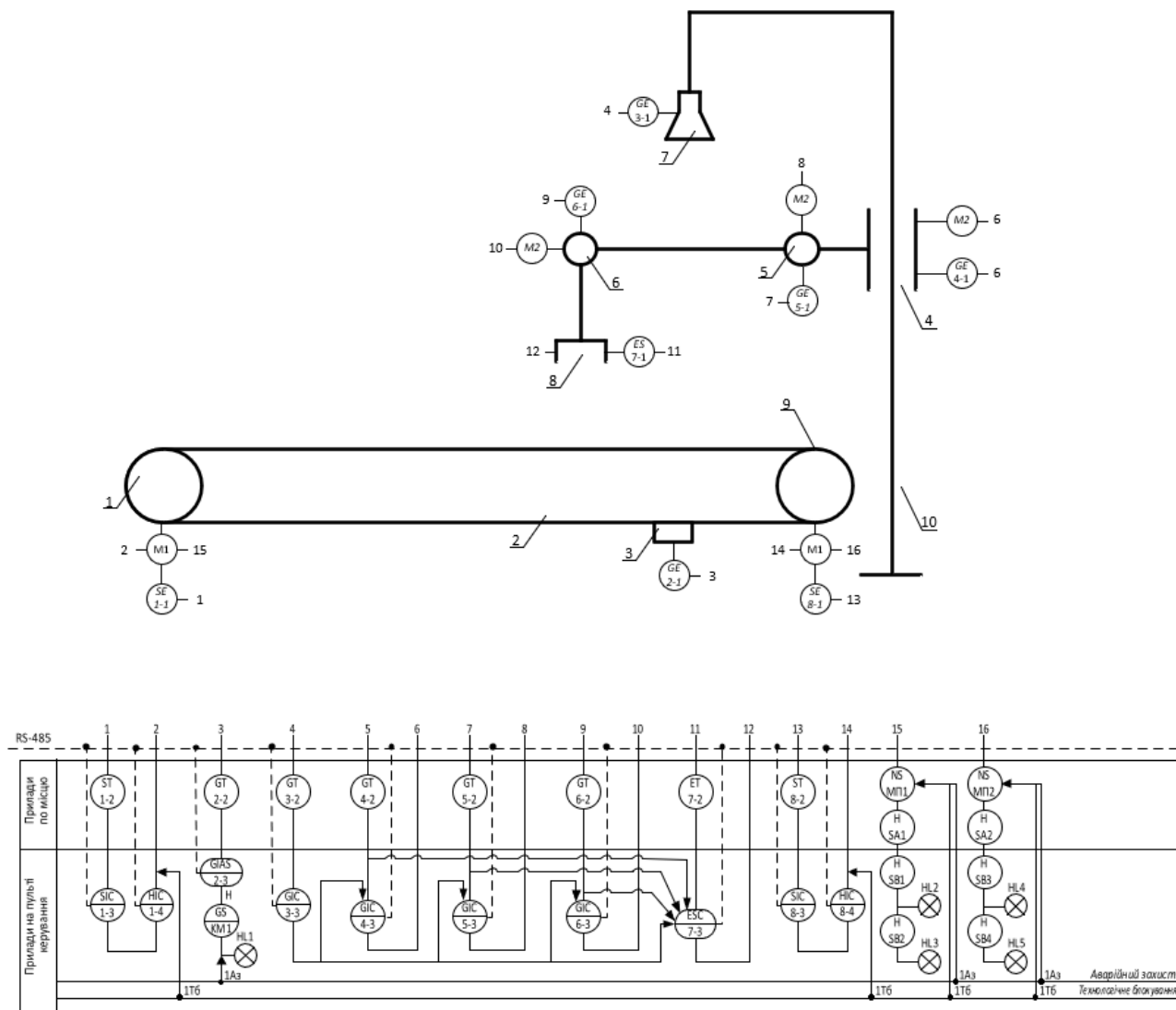


Рисунок 65 – схема технологічного процесу

Призначення першого та восьмого контурів - інформування оператора та регулювання швидкості конвеєрного приводу. До контуру входить первинний вимірювальний перетворювач швидкості SE (1-1, 8-1), засіб дистанційної передачі показників ST (1-2, 8-2), прилад регулювання SIC (1-3, 8-3), блок ручного управління HIC (1-4, 8-4).

Другий контур контролює відхилення стрічки на конвеєрі. До контуру входять первинний вимірювальний перетворювач відхилення GT (2-1), засіб

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		53

дистанційної передачі сигналу GT (2-2), блок сигналізації GIAS (2-3). Від приладу GIAS при спрацюванні сигналізації йде сигнал до пристрою перемикач GS з клемою KM1, а далі іде до лампи HL1 з сигналізацією критично високого значення.

Далі 3 контур індикує положення об'єкта на конвеєрі за допомогою камери. До контуру входять відеокамера GE (3-1), передавач сигналу GT (3-2), блок індикації та керування GIC (3-3), сигнал з якого відправляється на регулятори контурів 4-7

Призначення контурів 4-6 - інформування оператора та регулювання позицією ланок робота. До контурів входить первинний вимірювальний перетворювач положення GE (позиції 4-1, 5-1, 6-1), засіб дистанційної передачі показників GT (позиції 4-2, 5-2, 6-2), прилад регулювання GIC (позиції 4-3, 5-3, 6-3), який отримавши дані від камери, та від датчиків положення попередніх двигунів відправляє керування на відповідні двигуни.

Сьомий контур керує електромагнітом. До контуру входить електричний перемикач ES (7-1), засіб дистанційної передачі показників ET (7-2), прилад регулювання ESC (7-3), який приймає положення ланок двигунів та сигнал камери й перемикає електромагніт.

Контури NS відповідають за дистанційне керування двигунами конвеєра. У контурах використовуються перемикачі SA1, SA2 які відключають ланцюги електричної схеми від живлення двигунів. Вимикання живлення двигунів виконується за допомогою кнопки "СТОП" (SB1, SB3), також при натисканні кнопки вмикається сигнальна лампочка HL2, HL4. Вмикання живлення двигунів виконується за допомогою кнопки "ПУСК" (SB2, SB4), також при натисканні кнопки вмикається сигнальна лампочка HL3, HL5.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

5.2. Розробка принципової електричної схеми

Принципова електрична схема створена на основі розпіновки мінікомп'ютера LattePanda Alpha та інших елементів АСК – серводвигунів, камери, дисплея, зовнішнього живлення, реле та електромагніта.

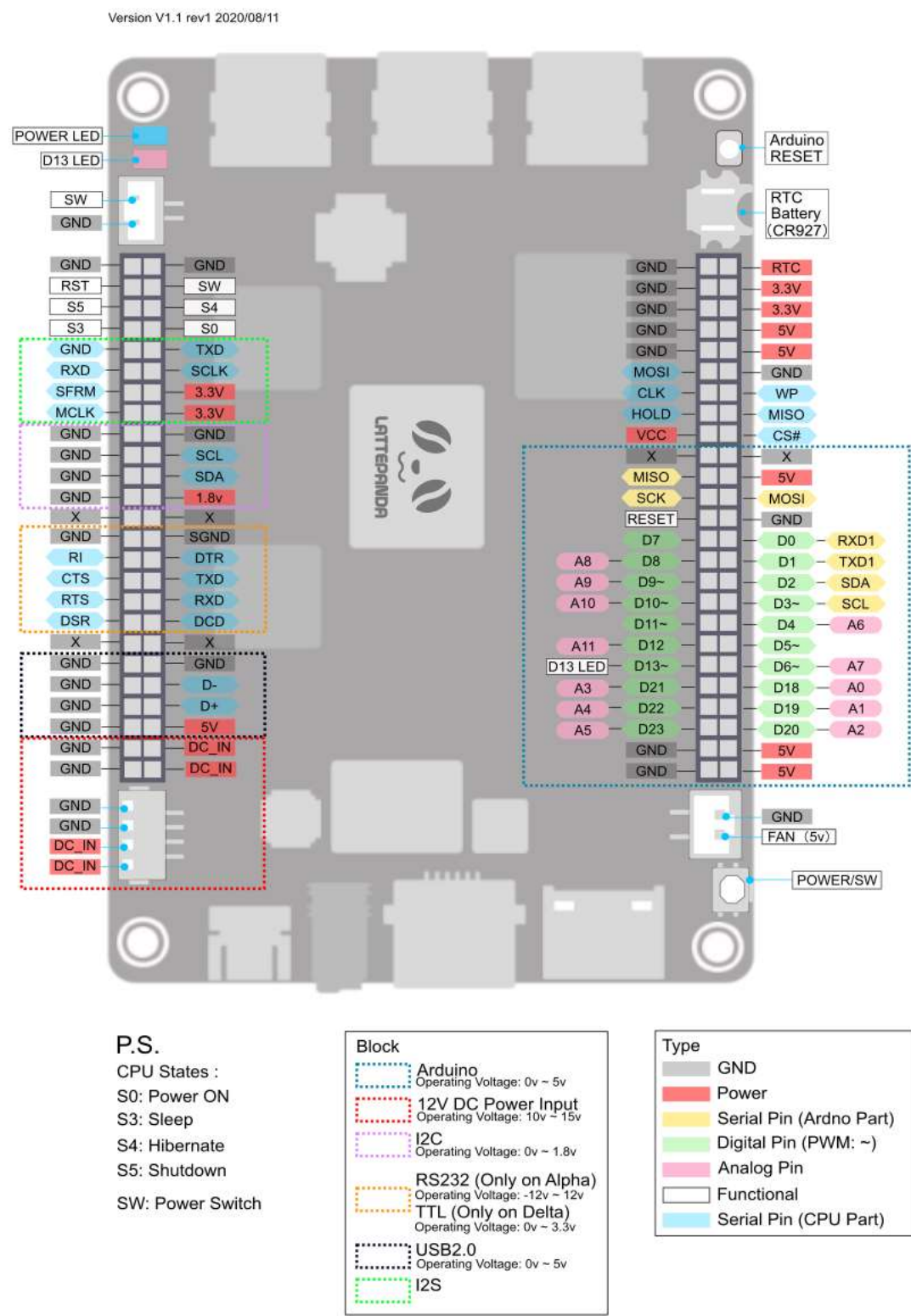


Рисунок 66 – розпіновка мінікомп'ютера LattePanda Alpha [39]

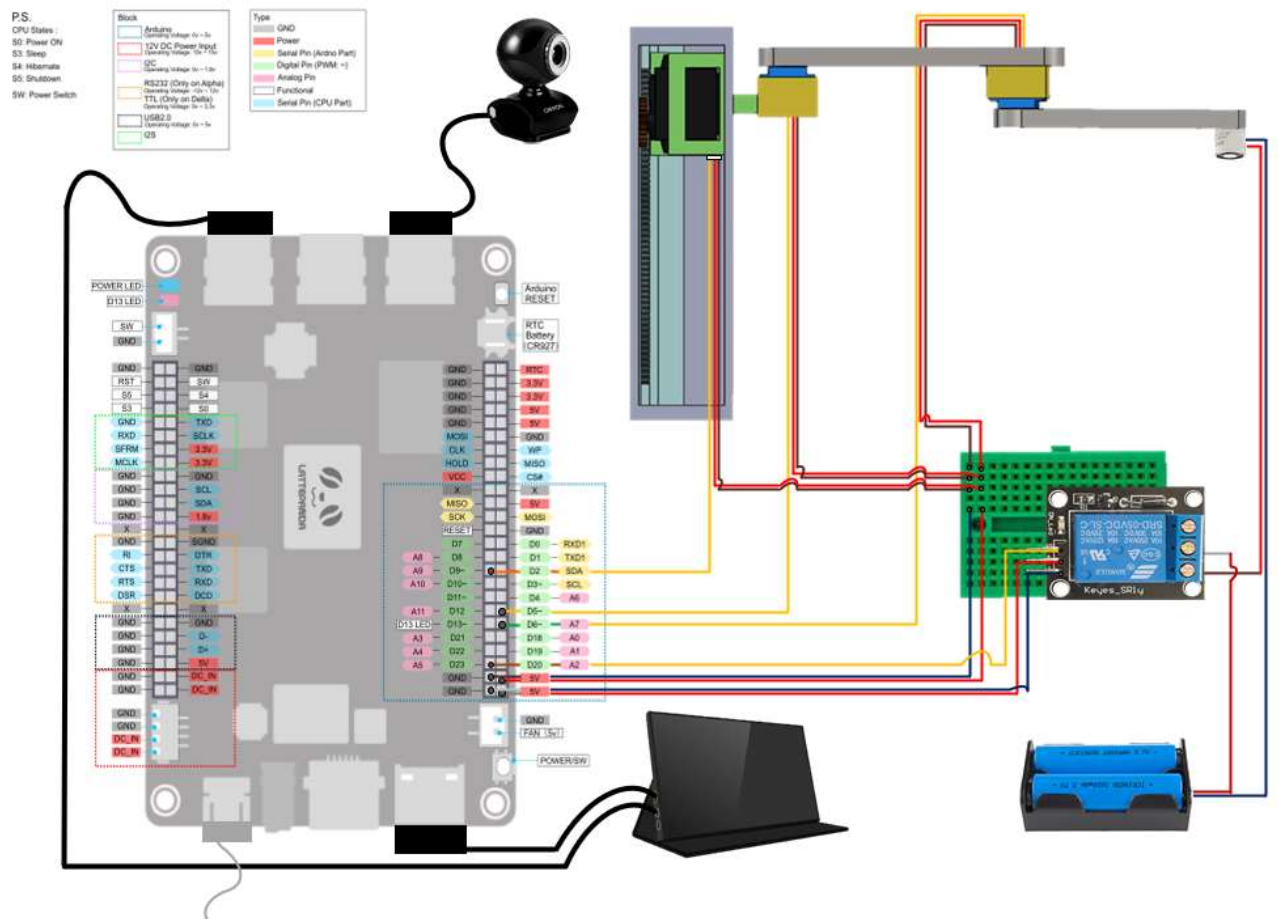


Рисунок 67 – принципова електрична схема

Камера підключена до LattePanda через USB-порт. Дисплей підключено через USB Type-C та HDMI порти.

Серводвигуни підключаються трьома проводами, де червоний та чорний відповідають за живлення, а оранжеві за керування. Провода керування підключені до D5, D6 та D9 пінів плати, які підтримують генерацію ШІМ сигналу. Живлення двигунів береться із пінів GND та 5v і через маленьку, зелену макетну плату поширюється на кожен двигун.

Підключення електромагніта відбувається через реле, оскільки вимагає зовнішнього джерела живлення, яке складається із 2 Li-ion акумулятори формату 18650. На вхід реле подається живлення із плати та сигнал керування через пін D23, на виході COM контакт реле підключений до позитивного контакту джерела живлення, а NO до позитивного контакту електромагніта. Також негативний контакт електромагніта та джерела живлення з'єднанні. При відсутності керування на піні D23 (низький логічний рівень) COM контакт

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ДПЛА12.04.00.000ПЗ

Арк.

56

реле з'єднаний із NC контактом, який ні до чого не під'єднаний, після подачі високого рівня на пін керування, контакт СОМ з'єднується із NO і живлення подається на електромагніт.

Висновок до розділу 5: було розроблено функціональну та принципову електричну схеми автоматизації. Реалізовано системи індикації, блокування, ручного та автоматичного керування, що забезпечують надійність і безпеку роботи.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ

Забезпечення безпечних умов під час експлуатації роботизованих пристроїв, таких як маніпулятори, є важливою складовою як для промислових, так і для освітніх цілей. Відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», кожна організація, яка впроваджує чи використовує подібні системи, зобов'язана гарантувати мінімізацію потенційних небезпек для здоров'я осіб, що взаємодіють із технікою. Це стосується не лише безпосередньої експлуатації, але й умов, у яких відбувається налагодження, обслуговування або тестування обладнання.

У межах дипломного проєкту на тему «Синтез системи керування роботом-маніпулятором у задачах сортування та переміщення об'єктів» було реалізовано лабораторний прототип. Він керується мікрокомп'ютером LattePanda Alpha, що містить вбудований мікроконтролер Arduino Leonardo, а рух забезпечують серводвигуни та електромагніт. Живлення для виконавчих механізмів організовано через окреме джерело напруги, з урахуванням необхідності стабілізації струму та запобігання перевантаженням.

Експлуатація системи здійснюється в лабораторних умовах Київського політехнічного інституту, де діють відповідні норми освітлення, мікроклімату та електробезпеки. Приміщення, у якому розміщено стенд, має площу близько 40 м², об'єм 120 м³, забезпечене природною та штучною вентиляцією, освітлювальними приладами, а також засобами пожежогасіння. За роботою комплексу спостерігає один оператор, що відповідає за запуск, контроль та вимкнення системи. Серед потенційних шкідливих факторів можна виокремити вплив електричного струму у разі пошкодження ізоляції або неправильного з'єднання, ризик займання через перевищення допустимого навантаження, а також зорове навантаження при тривалій роботі в умовах недостатньої освітленості. Особливої уваги потребує дотримання правил монтажу низьковольтних систем та контроль теплового режиму компонентів, що можуть перегріватися під час тривалого навантаження.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Отже, на всіх етапах роботи з робототехнічним комплексом необхідно забезпечити відповідність технічного стану обладнання вимогам безпеки, своєчасно проводити профілактичні перевірки, дотримуватись правил експлуатації згідно з чинним законодавством України в галузі охорони праці та інструкціями з технічної безпеки.

6.1. Вимоги до освітлення

Робота з роботизованим маніпулятором, яка передбачає візуальний контроль переміщення та сортування об'єктів розмірами до 20×20×20 мм, належить до IV розряду зорових робіт відповідно до вимог ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення». Такі роботи потребують високої точності зорового аналізу, як з боку людини, так і для коректного функціонування системи машинного зору.

Лабораторія, у якій експлуатується прототип автоматизованої сортувальної системи, обладнана великими вікнами розміром 2000 на 1200 мм, що забезпечують ефективне природне освітлення у денний час. Вимірний коефіцієнт природної освітленості (КПО) у сонячну погоду становить близько 4%, що перевищує нормативне значення 1,5% для IV розряду зорових робіт, установлене у ДБН. Це дозволяє забезпечити комфортну роботу оператора без додаткового навантаження на зір у денний час доби.

Для забезпечення достатнього рівня освітлення у темний період доби або при недостатньому природному світлі передбачено використання штучного освітлення. Використано шість вбудованих LED-панелей потужністю 36 Вт кожна, що забезпечують сумарний світловий потік понад 21000 лм. Завдяки цьому фактична освітленість у зоні роботи маніпулятора становить близько 300-320 лк, що відповідає та навіть перевищує мінімальні норми освітлення для зазначеного типу робіт. Обрані світлодіодні світильники вирізняються високою енергоефективністю, рівномірним розподілом світла та тривалим терміном служби. Вони створюють оптимальні умови не лише для

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

роботи оператора, а й для точної роботи відеокамери, яка здійснює виявлення об'єктів. Таким чином, реалізована система комбінованого освітлення повністю відповідає вимогам ДБН В.2.5-28:2018 і забезпечує безпечне, зручне та продуктивне середовище в лабораторії.

6.2. Пожежна безпека

Пожежна безпека є невід'ємною частиною загальної системи охорони праці, особливо при роботі з роботизованими платформами, які включають мікрокомп'ютери, сервомотори, релейні елементи та інші пристрої з електричним живленням. Лабораторне приміщення, в якому розміщено дослідницький стенд з роботом-маніпулятором, класифікується як категорія В згідно з ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» через наявність невеликої кількості горючих матеріалів і електронного обладнання. Відповідно до ПУЕ, приміщення належить до класу П-Па – електротехнічна зона з помірним ризиком виникнення пожежі.

Основні потенційні джерела займання у даному випадку включають короткі замикання в електричних колах, перевантаження або перегрів джерел живлення, знос ізоляції провідників, а також неправильну експлуатацію електронного обладнання. Приміщення оснащено системою пожежної сигналізації з димовими і температурними датчиками, які забезпечують оперативне виявлення ознак займання. Сигналізація поєднана з системою звукового та світлового сповіщення та підключена до системи виклику екстрених служб.

Лабораторія обладнана необхідними засобами пожежогасіння: порошковим вогнегасником ВП-5 для універсального гасіння загорянь та вуглекислотним вогнегасником ВВК-3,5 для електроніки, яка вимагає очищеного середовища без залишків речовин. Евакуаційні шляхи не мають перешкод, а відстань до найближчого виходу становить менше 10 метрів, що відповідає вимогам нормативів.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

У будівлі також реалізовано заходи з блискавкозахисту, а самі лабораторні роботи супроводжуються відповідними інструктажами та регулярними перевітками електромереж. Усі електроприлади, що експлуатуються в лабораторії, проходять візуальний контроль і не допускаються до роботи у випадку виявлення дефектів. Таким чином, дотримано всі ключові положення нормативної документації ДБН В.1.1-7:2016 і забезпечено відповідний рівень пожежної безпеки при роботі з робототехнічним обладнанням.

6.3. Мікроклімат

Мікроклімат робочого середовища безпосередньо впливає на ефективність виконання завдань, самопочуття оператора та загальну безпеку технологічного процесу. Його основними показниками є температура повітря, швидкість повітрообміну, відносна вологість та рівень теплового випромінювання. Регламентування мікрокліматичних умов у виробничих приміщеннях здійснюється відповідно до положень ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».

Завдання оператора у межах розробленого лабораторного комплексу, що керує роботом - маніпулятором, не пов'язане з інтенсивним фізичним навантаженням і виконується у положенні сидячи або стоячи, з періодичним оглядом процесу. Тому цей вид діяльності класифікується як легка праця категорії Ia, для якої допустимі витрати енергії не перевищують 120 ккал/год.

В лабораторії, де експлуатується робототехнічна система, підтримуються наступні параметри мікроклімату: температура повітря в межах 22–24⁰С, що відповідає нормативу як у теплу, так і в холодну пору року; швидкість повітряного потоку близько 0,1 м/с; відносна вологість на рівні 40-55%. Ці показники повністю відповідають встановленим санітарним нормам і створюють сприятливі умови для безпечної та комфортної роботи оператора, а також стабільного функціонування електронного обладнання.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

6.4. Електробезпека

Забезпечення електробезпеки є одним із ключових аспектів при експлуатації лабораторного обладнання, зокрема прототипу автоматизованої системи з роботом-маніпулятором. У лабораторії використовуються окремі джерела живлення: живлення сервоприводів здійснюється від імпульсного блока живлення 6 В із максимальною силою струму до 8 А, а електромагніт працює від акумуляторного джерела на базі двох Li-ion батарей формату 18650. Таке розділення джерел забезпечує енергетичну стабільність у роботі всіх виконавчих елементів системи.

Всі кабелі живлення надійно заізолювані, прокладені у герметичних пластикових коробах і розміщені на неструмопровідній підлозі. Лабораторія не містить відкритих струмопровідних частин та металевих елементів, що підвищують ризик ураження електричним струмом. Блок живлення, що живить серводвигуни, розміщений у безпечному місці та не має зовнішньо доступних контактів. Акумулятори для електромагніта розміщено в пластиковому корпусі з надійною ізоляцією та обмеженим доступом під час роботи.

Корпус LattePanda, як і решта електроніки, не має відкритих струмоведучих частин, тому використання засобів індивідуального захисту при роботі з установкою не є обов'язковим. Водночас дотримання загальних правил експлуатації - зокрема заборона на вологе прибирання або вживання рідин у робочій зоні - є обов'язковими заходами безпеки.

Загалом, реалізована система відповідає чинним нормам електробезпеки, а умови експлуатації відповідають положенням ПУЕ 2021 «Правила улаштування електроустановок». Лабораторія не належить до приміщень з підвищеною електробезпекою.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Висновок до розділу 6

На основі проведеного аналізу умов експлуатації автоматизованого лабораторного комплексу можна зробити висновок, що приміщення відповідає чинним вимогам безпеки. Рівень освітлення забезпечує комфортну зорову роботу та відповідає ДБН В.2.5-28:2018. Приміщення класифікується як пожежонебезпечне категорії В, однак завдяки наявності засобів протипожежного захисту та сигналізації вимоги ДБН В.1.1-7:2016 дотримано. Умови мікроклімату є стабільними та відповідають нормативам ДСН 3.3.6.042-99, що гарантує безпечну експлуатацію обладнання і комфорт для оператора. Щодо електробезпеки, всі джерела живлення є ізольованими, використано безпечні адаптери та акумулятори, що відповідає вимогам ПУЕ 2021. Таким чином, реалізовані заходи забезпечують комплексний захист персоналу під час експлуатації автоматизованої системи з роботом-маніпулятором.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проєкту були успішно реалізовані всі поставлені завдання. Проведено огляд сучасних підходів до автоматизації задач сортування та переміщення об'єктів із використанням роботизованих маніпуляторів. Було обґрунтовано вибір конструкції маніпулятора та кінематичної структури системи, розроблено математичну модель його роботи, а також виконано моделювання динаміки серводвигунів у середовищі MATLAB/Simulink.

Розроблено алгоритм визначення координат об'єктів на основі машинного зору, сформовано просторове завдання та реалізовано зворотну задачу кінематики для обчислення кутів обертання ланок. Здійснено синтез системи керування, що працює на базі LattePanda Alpha з інтегрованим Arduino Leonardo, яка забезпечує формування керуючих сигналів через широтно-імпульсну модуляцію.

Було розроблено принципову електричну та функціональну схеми автоматизації. Створено інтерфейс для ручного керування, адаптований до сенсорного дисплея, а також реалізовано вебінтерфейс для дистанційного контролю системи.

На основі чинних нормативів виконано аналіз потенційних небезпек, пов'язаних з експлуатацією установки, та розроблено заходи з охорони праці й електробезпеки при роботі з керуючими пристроями.

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tayade, P. Material Handling Robotics Market Size and Share Analysis – Growth Trends and Forecasts (2025–2032) [Електронний ресурс] // Coherent Market Insights. Доступ: <https://www.coherentmarketinsights.com/industry-reports/material-handling-robotics-market>
2. The Hazards of Metal Fabrication: Why Metal Workers Face Greater Risks [Електронний ресурс] // Arnold&Itkin LLP. Personal Injury Blog. – Доступ: <https://www.arnolditkin.com/blog/work-accidents/the-hazards-of-metal-fabrication-why-metal-work>
3. Klimchik, A. Enhanced stiffness modeling of serial and parallel manipulators for robotic-based processing of high performance materials [Електронний ресурс] // ResearchGate. – Доступ: https://www.researchgate.net/figure/A-serial-Kuka-robot-a-and-an-Adept-parallel-robots-b_fig3_281183936
4. Sharma, S. What are manipulator robots? Understanding their Design, Types, and Applications [Електронний ресурс] // Wevolver. – Доступ: <https://www.wevolver.com/article/robot-manipulator>
5. Baizid, K., Ćuković, S., Iqbal, J., Yousnadj, A., Chellali, R., Meddahi, A., Devedzic, G., Ghionea, I. IRoSim: Industrial Robotics Simulation Design Planning and Optimization Platform based on CAD and Knowledgeware Technologies [Електронний ресурс] // ResearchGate. – Доступ: https://www.researchgate.net/figure/Workspace-3D-models-of-some-common-industrial-manipulators_fig8_304657354
6. HowToRobot Editorial team. Robot Grippers and End Effectors: Uses, Benefits, and Cost Analysis [Електронний ресурс] // HowToRobot. – Доступ: <https://howtorobot.com/expert-insight/robot-end-effectors>
7. ISO 9283:1998. Manipulating industrial robots-Performance criteria and related test methods [Електронний ресурс] // International Organization for Standardization. Доступ:

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

<http://db.csstgc.com.cn/userfiles/8008b6878bb7492c94fbdffe41fb1fd9/files/tackSolution/2019/11/ISO%209283-1998.pdf>

8. Medium type SCARA robots YK-XG. Introduces the medium size SCARA robots [Електронний ресурс] // Yamaha Motor Co., Ltd. – Доступ: <https://global.yamaha-motor.com/business/robot/lineup/ykxg/middle/>
9. RS403 Series Scara Robot. RS403 Series Scara Robot [Електронний ресурс] // Hiwin Singapore Pte Ltd. – Доступ: <https://www.hiwin.sg/product/rs403-series-scara-robot/>
10. ABB IRB360 FlexPicker. IRB360 – high-speed industrial delta robot for packaging and picking applications [Електронний ресурс] // Robots.com. – Доступ: <https://www.robots.com/industrial-robots/abb-irb-360>
11. Quattro. Four-axis parallel robot achieves high speed and high precision [Електронний ресурс] // Omron Industrial Automation Europe. – Доступ: <https://industrial.omron.eu/en/products/quattro>
12. Planar surface gantry EXCM. Great functionality in a tiny package: the parallel kinematic actuator keeps moving loads low and your footprint small [Електронний ресурс] // Festo Corporation USA. – Доступ: https://www.festo.com/us/en/p/planar-surface-gantry-id_EXCM_FP/
13. KUKA KR 6 Agilus. Small robot [Електронний ресурс] // iF Design Award. – Доступ: <https://ifdesign.com/en/winner-ranking/project/kuka-kr-6-agilus/148449>
14. Compatibility of joints (CB-Series CB3 and e-Series). In this article you can find a clear and comprehensible table that shows which joint sizes can be used on which robot [Електронний ресурс] // Universal Robots. – Доступ: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/robot-care-maintenance/compatibility-of-joints-cb-series-cb3-and-e-series/>
15. Wireless teach pendants for robots. Wireless teach pendants are allowed in the EU and USA but remain uncommon [Електронний ресурс] // RoboticsBook.com. – Доступ: <https://roboticsbook.com/wireless-teach-pendants-for-robots/>

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

16. Iranica, S., Uk, M. E., Eldogan, O. Modeling, control, and simulation of a SCARA PRR-type robot manipulator [Електронний ресурс] // Semantic Scholar. – Доступ: <https://www.semanticscholar.org/paper/Modeling%2C-control%2C-and-simulation-of-a-SCARA-robot-Iranica-Uk/f4d77a2d582fe05a5ae217cd356e5782bd9bedf2>
17. Robot end-of arm tooling. Inlearn Intelligent e-learning systems in robotics/mechatronics [Електронний ресурс] // Tallinna Tööstushariduskeskus (TTHK). – Доступ: <https://www.tthk.ee/inlearn/7-robot-end-of-arm-tooling/>
18. Cobot-Ready End-Effector Kits. All-in-one robotic end-of-arm tooling packages [Електронний ресурс] // ATI Industrial Automation. – Доступ: <https://www.ati-ia.com/products/cobot/cobotready.aspx?campaign=none3>
19. Robot Magnetic Grippers VS Mechanical Grippers – Unloading Steel Round Bar. Comparison of gripping solutions for robotic handling [Електронний ресурс] // HVR Magnetics Co., Ltd. – Доступ: <https://www.hvrmagnet.com/case/robot-magnetic-grippers-vs-mechanical-grippers-75.html>
20. Magnetic Grippers SGM-HP/-HT. Magnetic gripper series for handling metal sheets, bistable permanent magnet [Електронний ресурс] // *Schmalz-Vacuum Technology for Automation*. – Доступ: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/special-grippers/magnetic-grippers/magnetic-grippers-sgm-hp-ht-306089/>
21. Electro-permanent Magnets VS Electromagnets – Lifting Spring Steel Plates for Machining. Application comparison in industrial automation [Електронний ресурс] // HVR Magnetics Co., Ltd. – Доступ: <https://www.hvrmagnet.com/case/electro-permanent-magnets-lifting-spring-steel-plates-for-machining-80.html>
22. Lifting Magnets – Knowledge Base: Working Principles of Electro Permanent Lifting Magnets. Technical explanation of EPLM operation [Електронний

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

- ресурс] // Armstrong Magnetics, Inc. – Доступ: <https://www.armsmag.com/info-technical-data-lifting-magnets-knowledge-working-principles-eplm.html>
23. Permanent Electromagnetic Gripper or Vacuum Gripper – Robot Handling Metal Sheet for Bending Machine. Application case in automated sheet handling [Електронний ресурс] // HVR Magnetics Co., Ltd. – Доступ: <https://www.hvrmagnet.com/case/permanent-electromagnetic-gripper-or-vacuum-gripper-81.html>
24. Vacuum End Effectors VEE. Assembly instead of Construction [Електронний ресурс] // *Schmalz – Vacuum Technology for Automation*. – Доступ: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/area-gripping-systems-and-end-effectors/vacuum-end-effectors-vee/>
25. What is a RC Servo? Basic principles and structure of radio-controlled servo motors [Електронний ресурс] // *ServoCity – Servo Education Center*. – Доступ: <https://www.servo.net/what-is-a-rc-servo.html>
26. Широтно-імпульсна модуляція. Вікіпедія: вільна енциклопедія [Електронний ресурс] / дописувачі Вікіпедії. – Постійне посилання: https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A8%D0%B8%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE-%D1%96%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BD%D0%B0_%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%86%D1%96%D1%8F&oldid=45144810
27. Duty cycle. Wikipedia: The Free Encyclopedia [Електронний ресурс] / Wikipedia contributors. – Permanent link: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Duty_cycle&oldid=1289875259
28. Controlling Servos. Servo control using PWM Expansion and Python [Електронний ресурс] // *Onion Omega2 Maker Kit Documentation*. – Доступ: <https://docs.onion.io/omega2-maker-kit/maker-kit-servo-controlling-servo.html>

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

29. McComb, G. Using Radio Control Servo Motors in Robotics [Електронний ресурс] // *SERVO Magazine*. – Доступ: https://www.servomagazine.com/magazine/article/july2014_McComb
30. How Servo Motor Works & Interface It With Arduino. Step-by-step tutorial with diagrams and code [Електронний ресурс] // *LastMinuteEngineers.com*. – Доступ: <https://lastminuteengineers.com/servo-motor-arduino-tutorial/>
31. Servo control. Wikipedia: The Free Encyclopedia [Електронний ресурс] / Wikipedia contributors. – Permanent link: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Servo_control&oldid=1220921509
32. Hough Circle Transform. Circle detection tutorial in OpenCV [Електронний ресурс] // *OpenCV Documentation 3.4*. – Доступ: https://docs.opencv.org/3.4/d3/de5/tutorial_js_houghcircles.html
33. Histogram Equalization. Image contrast enhancement tutorial in OpenCV [Електронний ресурс] // *OpenCV Documentation 3.4*. – Доступ: https://docs.opencv.org/3.4/d4/d1b/tutorial_histogram_equalization.html
34. Smoothing Images. Image filtering tutorial using OpenCV functions [Електронний ресурс] // *OpenCV Documentation 4.x*. – Доступ: https://docs.opencv.org/4.x/d4/d13/tutorial_py_filtering.html
35. Мінімакс. Вікіпедія: вільна енциклопедія [Електронний ресурс] / дописувачі Вікіпедії. – Постійне посилання: <https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9C%D1%96%D0%BD%D1%96%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D1%81&oldid=40194179>
36. Комбінаторний вибух. Вікіпедія: вільна енциклопедія [Електронний ресурс] / дописувачі Вікіпедії. – Постійне посилання: https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%B1%D1%96%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B2%D0%B8%D0%B1%D1%83%D1%85&oldid=39287917

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

- 37.Відсічення альфа-бета. Вікіпедія: вільна енциклопедія [Електронний ресурс] / дописувачі Вікіпедії. – Постійне посилання: https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%92%D1%96%D0%B4%D1%81%D1%96%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0-%D0%B1%D0%B5%D1%82%D0%B0&oldid=35542168
- 38.MiiElAOD 12.5 inch 4K IPS Touch Display for LattePanda Alpha/Delta and Raspberry Pi 4B. Product description [Електронний ресурс] // Amazon.com. – Доступ: <https://www.amazon.com/MiiElAOD-Touch-Display-LattePanda-Raspberry/dp/B0CC96DMYH>
- 39.Hardware Interface and Playability. Pinout and hardware diagram for LattePanda Alpha Edition [Електронний ресурс] // *LattePanda Documentation*. – Доступ: https://docs.lattepanda.com/content/alpha_edition/io_playability/#m2-interface

					ДПЛА12.04.00.000ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

ДОДАТОК 1. ВИВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ФОРМУЛ

1) Перетворення прогальності назад у ширину імпульсу відбувається шляхом її множення на період сигналу: $PWM_WIDTH = DC \cdot T$

2) Перетворення ШІМ сигналу у градуси відбувається за формулою:

$$\theta^{\circ} = \frac{pwm - pwm_min}{pwm_max - pwm_min} \cdot 180^{\circ}$$

3) Час керування двигуном тіла, рухомого через зубчасту передачу:

Шестерня має наступні параметри:

$$M \text{ (модуль)} = 1 \text{ мм}, \quad N \text{ (кількість зубців)} = 25,$$

$$\text{Pitch Diameter} = M \cdot N = 25 \text{ мм.}, \quad \text{Pitch (крок зубців)} = \pi \cdot M.$$

$$\text{Залежність між переміщенням та кутом повороту: } H = \frac{N \cdot \pi \cdot M \cdot \theta^{\circ}}{360^{\circ}} = \frac{25\pi \cdot \theta^{\circ}}{360^{\circ}} \text{ [мм]}$$

$$\text{Звідси кут повороту, необхідний для проходження заданої відстані: } \theta^{\circ} = \frac{360^{\circ} \cdot H}{25\pi}$$

Час, протягом якого буде здійснено керування (час обертання):

$$T = \frac{\theta^{\circ}(H)}{w} \text{ [с]}, \text{ де } w \text{ — кутова швидкість}$$

Згідно з параметрами двигуна, кутова швидкість при напрузі 4.8В та 6В:

$$w_{4.8\text{В}} = \frac{60^{\circ}}{0.17\text{сек.}} = \frac{352.9^{\circ}}{1\text{с.}} \text{ [град/с]}, \quad w_{6\text{В}} = \frac{60^{\circ}}{0.13\text{сек.}} = \frac{461.5^{\circ}}{1\text{с.}} \text{ [град/с]}$$

Тоді час:

$$T_{4.8\text{В}} = \frac{\theta^{\circ}(H)}{352.9} \text{ [с]}, \quad T_{6\text{В}} = \frac{\theta^{\circ}(H)}{461.5} \text{ [с]}$$

4) Перетворення ШІМ сигналу в напругу:

Формула для зворотного напрямку. Маємо PWM-імпульси в діапазоні від $\text{min_pulse}=1.0\text{мс}$ до $\text{neutral}=1.5\text{мс}$, які відповідають зміні напруги від 6 В до 0 В:

$$\text{voltage} = 6 * (\text{neutral} - \text{pwm_width}) / (\text{neutral} - \text{min_pulse});$$

Формула для прямого напрямку. PWM-імпульси в діапазоні від $\text{neutral} = 1.5 \text{ мс}$ до $\text{max_pulse} = 2.0 \text{ мс}$, які відповідають зміні напруги від 0 В до 6 В.

$$\text{voltage} = 6 * (\text{pwm_width} - \text{neutral}) / (\text{max_pulse} - \text{neutral});$$