

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«До захисту допущено»
В.о. завідувача кафедри
_____ Галина БОГДАН

« ____ » _____ 2025 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему: «Роботизоване сортування об'єктів виробництва. Апаратне
забезпечення»

Виконав:
студент IV курсу, групи ПМ-11
Боярчук Іван Вікторович _____

Керівник:
професор, д.т.н.
Черепанська Ірина Юріївна _____

Рецензент:
професор, д.т.н.
Шевченко Костянтин Леонідович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування	Кількість листів	Примітка	
1	A4				Завдання на дипломний проєкт	2		
2	A4	ДПБ.ПМ-11.03.1760.000.ПЗ			Пояснювальна записка	94		
3	A1	ДП.ПМ.11.03.1760.001.СхК			Схема кінематична	1		
4	A1	ДП.ПМ.11.03.1760.002.СхЕ			Схема електрична принципова	1		
5	A1	ДП.ПМ-11.03.1760.003.СхС			Схема структурна	1		
6	A1	ДП.ПМ-11.03.1760.004.СК			Складальний кресленик	1		
					ДПБ ПМ11.03.1760.000.ПЗ			
		ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту		Лист	Листів
Розробник		Боярчук І.В..					1	1
Керівник		Черепанська І.В.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-11	
Консульт.								
Н/контр.								
В.о. зав. каф.		Богдан.Г.А.						

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Роботизоване сортування об'єктів
виробництва. Апаратне забезпечення»

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

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Боярчуку Івану Вікторовичу

1. Тема роботи «Роботизоване сортування об'єктів виробництва. Апаратне забезпечення», керівник роботи Черепанська Ірина Юріївна, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. №1765-с.
2. Термін подання студентом проєкту «06» червня 2025.
3. Вихідні дані до проєкту: Роботизоване сортування об'єктів виробництва. Апаратне забезпечення.
4. Зміст пояснювальної записки: вступ, аналіз сучасного стану проблеми роботизованого сортування об'єктів виробництва машино- та приладобудування, розробка структурної схеми системи роботизованого сортування, розробка кінематичної схеми маніпулятора промислового робота, розробка схеми електричної принципової макету маніпулятора промислового робота для автоматизованого сортування, розробка макету маніпулятора

промислового робота для автоматизованого сортування, висновки, напрямки подальших досліджень, перелік джерел інформації.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) схема структурна, схема кінематична, схема електрична принципова, макет, презентація

6. Дата видачі завдання «22» лютого 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми роботизованого сортування об'єктів виробництва машино- та приладобудування	02.03.2025	
2	Розробка структурної схеми системи роботизованого сортування	24.03.2025	
3	Розробка кінематичної схеми маніпулятора промислового робота	06.04.2025	
4	Розробка схеми електричної принципової макету маніпулятора промислового робота для автоматизованого сортування	03.05.2025	
5	Розробка макету маніпулятора промислового робота для автоматизованого сортування	29.05.2025	
	Вступ	30.05.2025	
	Висновки	31.05.2025	
	Напрямки подальших досліджень	01.06.2025	
	Оформлення списку використаних джерел	03.06.2025	

Студент

Іван БОЯРЧУК

Керівник

Ірина ЧЕРЕПАНСЬКА

Анотація

Метою дипломного проєкта є розробка макету промислового робота, зокрема його апаратного забезпечення для реалізації процесу роботизованого сортування об'єктів виробництва машино- та приладобудування.

У дипломному проєкті здійснено аналіз сучасного стану проблеми роботизованого сортування, а саме визначено необхідність розвитку роботехніки в Україні, оскільки він знаходиться на дуже низькому рівні. Розроблено загальну структурну схему системи роботизованого сортування, а також розроблено кінематичну схему макету промислового робота, що визначає його основні геометричні та функціональні параметри.

Також розроблено схему електричну принципову макету маніпулятора промислового робота для автоматизованого сортування. Останній розділ присвячений розробці макету маніпулятора промислового робота, зокрема опису конструкції та матеріалу з якого було надруковано на 3D-принтері.

Ключові слова: промисловий робот, сервопривід, роботизоване сортування, автоматизація, маніпулятор

Abstract

The aim of the thesis project is to develop a model of an industrial robot, in particular its hardware for the implementation of the process of robotic sorting of objects in the machine and instrument engineering industry.

The thesis project analyses the current state of robotic sorting, namely, it identifies the need for the development of robotics in Ukraine, as it is currently at a very low level. A general structural diagram of the robotic sorting system has been developed, as well as a kinematic diagram of the industrial robot model, which defines its main geometric and functional parameters.

An electrical schematic diagram of the industrial robot manipulator model for automated sorting has also been developed. The last section is devoted to the development of a model of an industrial robot manipulator, in particular, a description of the design and material from which it was printed on a 3D printer.

Keywords: industrial robot, servo drive, robotic sorting, automation, manipulator

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП	12
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ РОБОТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ ОБ’ЄКТІВ ВИРОБНИЦТВА МАШИНО- ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ.....	14
1.1. Зміст та структура задачі роботизованого сортування об’єктів виробництва на прикладі приладо- та машинобудування.....	14
1.2. Огляд сучасного стану проблеми автоматизованого сортування об’єктів виробництва у приладо- та машинобудуванні.....	17
1.2.1. Роботизовані системи сортування поштових відправлень та вантажів.....	21
1.2.2. Роботизована система сортування сміття	22
1.2.3. Використання сортувальних роботів у різних галузях промисловості	25
1.2.4. Розвиток робототехніки в Україні.	28
1.3. Формулювання вимог до розроблюваного промислового робота для реалізації процесу роботизованого сортування об’єктів виробництва	28
1.3.1. Формування вимог до об’єктів виробництва, що до їх роботизованого сортування	29
1.4. Мета та завдання дипломного проекту.....	31
2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ РОБОТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ.....	33

					<i>ПМ11.03.1760.01.000 ПЗ</i>		
Змн.	Арк	№ докум	Підпис	Дата			
Розробив		Боярчук І.В.			<i>Пояснювальна записка</i>		
Перевір.		Черепанська І.В.					
Реценз.							
Н. Контр.							
Затверд.							
					Літ.	Арк.	Акрушів
						8	
					<i>ПБФ, КПІ</i>		

2.1. Розробка структурної схеми системи керування маніпулятором промислового рота	33
2.2. Розробка структурної схеми підсистеми керування системи автоматичного керування маніпулятором промислового робота.....	35
2.3. Аналіз об'єкта керування та розробка його параметричної моделі	37
2.4. Висновки до розділу	39
3. РОЗРОБКА КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА.....	41
3.1. Загальне поняття про розроблювану кінематичну схему маніпулятора промислового робота	41
3.2. Розробка кінематичної схеми маніпулятора промислового робота	44
3.3. Розрахунок динамічних характеристик кінематичних пар маніпулятора ПР	46
3.4. Висновки до розділу	51
4. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МАКЕТУ МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ	52
4.1. Розробка схеми електричної принципової керування сервоприводами	52
4.2. Розрахунок та вибір елементної бази схеми електричної принципової	56
4.2.1. Розрахунок та вибір мікроконтролера	56
4.2.2. Розрахунок та вибір сервоприводів	58
4.2.3. Розрахунок та вибір з'єднувальних провідників	64
4.3. Розробка переліку елементів схеми електричної принципової	66
4.4. Висновки до розділу	67

5. РОЗРОБКА МАКЕТУ МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ	68
5.1. Вибір середовища для розробки макету маніпулятора промислового робота	68
5.2. Вибір матеріалу та способу виготовлення макету маніпулятора промислового робота	68
5.3. Опис конструкції макету маніпулятора промислового робота	71
5.4. Висновки до розділу	81
ВИСНОВКИ.....	83
НАПРЯМКИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	85
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ	86
ДОДАТКИ.....	89

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ОК – об'єкт керування

ПСК – підсистема керування

ПР – промисловий робот

ОВ – об'єкт виробництва

ЗЗ – зворотній зв'язок

ТО – технологічне обладнання

СК – система координат

САК – система автоматичного керування

МК - мікроконтролер

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості автоматизація є ключовим фактором підвищення продуктивності, якості та конкурентоспроможності виробництва. Одним із найважливіших напрямів автоматизації є впровадження роботизованих систем, які дозволяють замінити людину у виконанні рутинних, трудомістких і точних операціях. Особливої актуальності набуває роботизоване сортування об'єктів виробництва, адже ця технологічна операція є обов'язковою в багатьох технологічних процесах — від первинної обробки до комплектування готової продукції.

Актуальність теми полягає в тому, що сучасне виробництво характеризується високою гнучкістю, мінливою номенклатурою деталей і жорсткими вимогами до точності обробки та логістики. За таких умов традиційні ручні або напівавтоматичні системи сортування часто виявляються малоефективними, що обумовлює необхідність переходу до автоматизованих рішень. Роботизовані системи сортування дозволяють забезпечити безперервність виробничого циклу, зменшити вплив людського фактору, підвищити надійність і швидкість обробки об'єктів, а також адаптуватися до змін умов праці або типу об'єктів.

Метою дипломного проєкта є розробка макету промислового робота, зокрема його апаратного забезпечення для реалізації процесу роботизованого сортування об'єктів виробництва машино- та приладобудування. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- 1) Провести аналіз проблеми роботизованого сортування об'єктів виробництва машино- та приладобудування.
- 2) Розробити структурну схему системи роботизованого сортування.
- 3) Розробити кінематичну схему маніпулятора промислового робота.
- 4) Розробити схему електричну принципову макету маніпулятора промислового робота.

5) Розробити макет маніпулятора промислового робота для демонстрації функцій роботизованого сортування.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ РОБОТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ВИРОБНИЦТВА МАШИНО- ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

1.1. Зміст та структура задачі роботизованого сортування об'єктів виробництва на прикладі приладо- та машинобудування

Однією із найскладніших задач упорядкування виробничого середовища в роботизованих механоскладальних виробництвах машино- та приладобудування є задача автоматизованого сортування об'єктів виробництва (ОВ). Під ОВ розуміють деталі, складальні одиниці, комплектуючі вироби, з якими взаємодіють промислові роботи (ПР) та інше технологічне обладнання [1]. А виробниче роботизоване середовище утворюємножина технологічного обладнання (ТО), оснащення, різна тара, комплектуючі та інші елементи необхідні для організації процесу виробництва.

Із літератури [1] відомо, що допоміжні операції, які пов'язані із упорядкуванням виробничого середовища займають значну частку часу, що витрачається на технологічний процес виробництва. Зокрема від 20%до 70% при обробці дрібних і середніх деталей, а також до 70% — для великих ОВ. Саме тому на сучасних машино- та приладобудівних виробництвах значна увага приділяється автоматизації таких операцій. Це дає змогу суттєво скоротити витрати допоміжного часу. Зокрема особливої уваги потребують операції сортування ОВ.

Загалом упорядкування виробничого середовища це складний процес, який полягає у переведенні ОВ із деякої кінцевої множини положень у просторі в деяке кінцеве наперед задане положення у зоні захоплення їх ПР або іншого ТО [1].

З урахуванням того, що ПР є одними із основних засобів автоматизації сучасного машино- та приладобудівного виробництва очевидно, що

роботизація сортування ОВ як одна із основних операцій упорядкування виробничого середовища є надзвичайно важливою та актуальною задачею. Зміст та місце задачі роботизованого сортування ОВ схематично наведено на рис. 1.1.

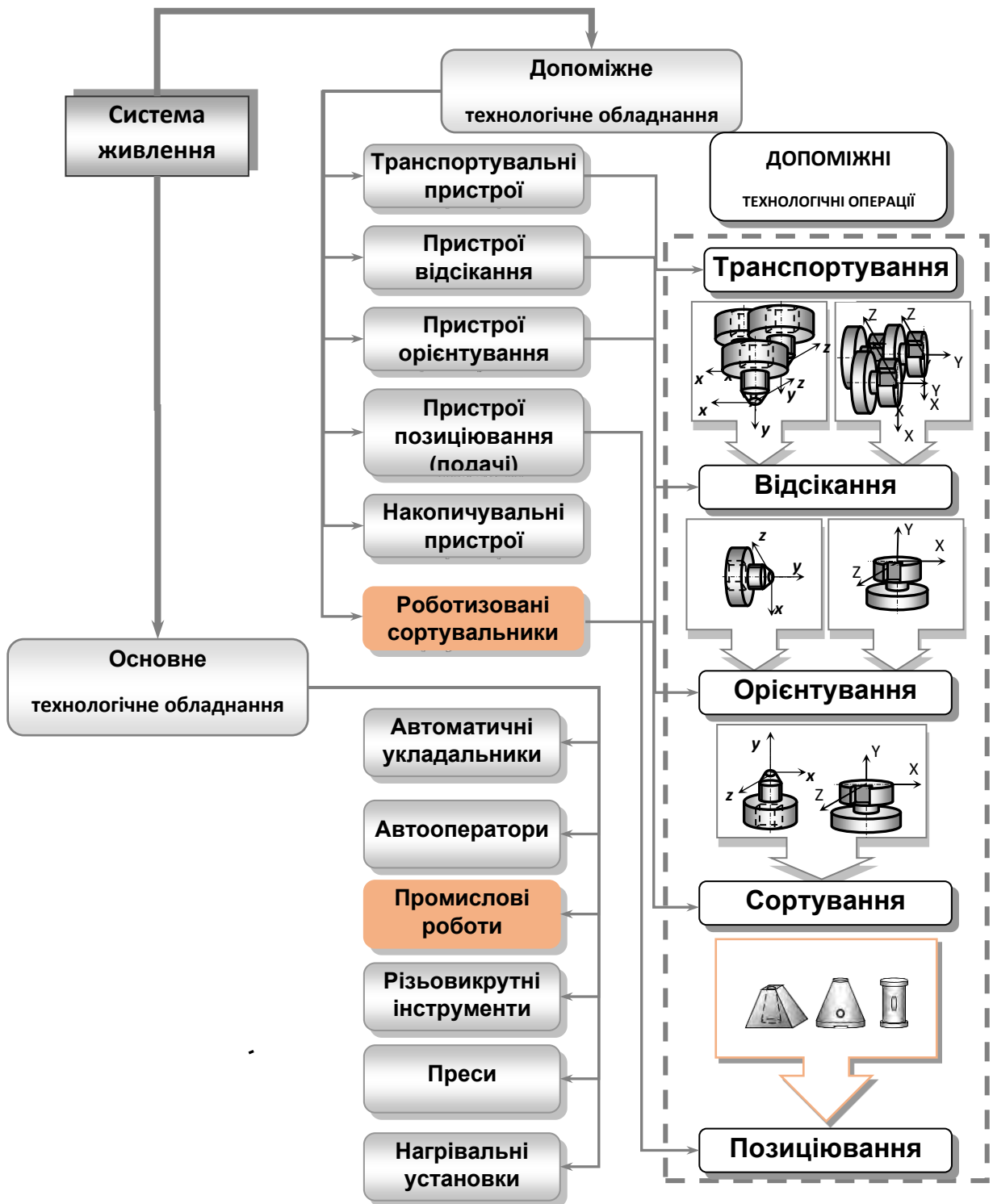


Рис. 1.1. Зміст та місце задачі роботизованого сортування ОВ у технологічних процесах виробництва в машино- та приладобудуванні [1]

Сортування є однією із найбільш розповсюджених технологічних операцій, яка виконується при реалізації різних технологічних процесів. Як правило вона є монотонною, що призводить до швидкої втоми працівників, які втрачають концентрацію уваги і допускають помилки, що можуть дорого коштувати підприємству. Це обумовлює необхідність та актуальність автоматизації технологічної операції сортування.

У випадку застосування ПР для автоматичного сортування ОВ цей процес можна називати роботизованим сортуванням. Незважаючи на оманливу простоту операції сортування, вона потребує високої точності, швидкодії та надійності виконання, особливо при роботі з різноманітними за формою, розміром чи орієнтацією ОВ. Роботизоване сортування вимагає чіткого виявлення положення ОВ у просторі, правильної траєкторії переміщення, а також адаптації до змін у виробничому середовищі.

Загалом сутність процесу роботизованого сортування ОВ полягає в наступному:

- автоматизоване виявлення ОВ у зоні їх захоплення ПР;
- автоматичне або автоматизоване розпізнавання та класифікація ОВ за множиною різноманітних ознак, наприклад, формою, розмірами, матеріалами, фізичними властивостями тощо;
- розміщення ОВ відповідно до заданих критеріїв (форми, розміру тощо) у відповідні зони або контейнери.

При чому, для ефективності роботизованого сортування повинні бути дотримані вимоги щодо точності, швидкості та повторюваності операцій, а також зменшення впливу людського фактора.

Особливу увагу при роботизації сортування ОВ приділяють формі і розмірам робочої зони ПР. Під робочою зоною ПР розуміють простір, у межах якого маніпулятор ПР здатен виконувати робочі операції з необхідною точністю та швидкістю. Її форма та об'єм залежать від конструкції ПР, кількості ступенів свободи, довжини ланок і типу приводу ПР. Правильне визначення та оптимізація робочої зони є критично важливими для

забезпечення ефективного сортування об'єктів, мінімізації простоїв та уникнення зіткнень із навколишнім обладнанням.

Відомими є декілька видів робочих зон, що наводяться у літературі [1], зокрема робоча зона на площині, на поверхні, у формі паралелепіпеда, циліндрична, сферична або комбінована. Кожній робочій зоні відповідає власна система координат, в якій здійснюються рухи захватного пристрою (ЗП) ПР [1] (рис. 1.2).

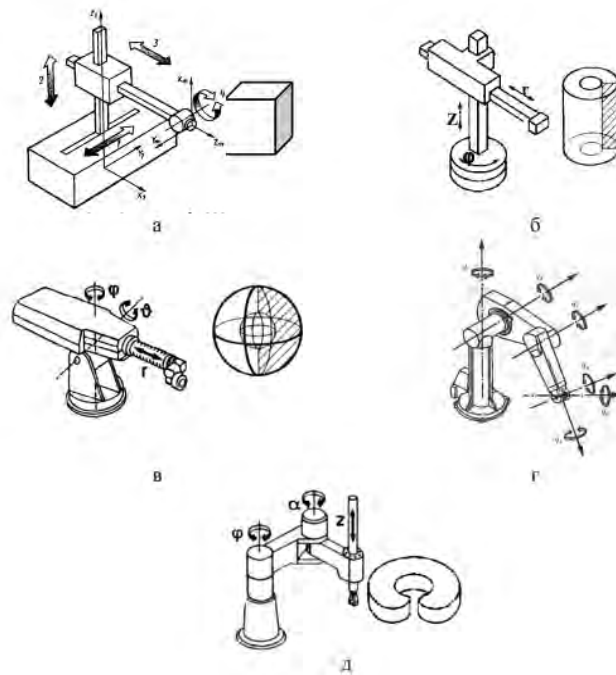


Рис. 1.2. ПР, що працюють у різних системах координат: а) декартовій, б) циліндричній, в) сферичній, г) складній сферичній або ангулярній, д) складній циліндричній або СК "SCARA" [1]

1.2. Огляд сучасного стану проблеми автоматизованого сортування об'єктів виробництва у приладо- та машинобудуванні

На сучасному етапі розвитку машино- та приладобудівної промисловості спостерігається бурхливий розвиток досліджень щодо автоматизації процесусортування різних ОБ, а також створення засобів автоматизованого сортування, у тому числі ПР. Зокрема в літературі [3] наведено

опис роботизованої система сортування t-Sort від компанії TompkinsRobotics (США), що використовуються на промислових складах. Вказана система базується на використанні автономних мобільних роботів, які призначені для захоплення певних видів складських запасів на станції завантаження, транспортування їх до пункту збору, де збирається замовлення відповідного товару, та вивантаження цих запасів у відповідні контейнери, ємності або відсіки (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Роботизовані системи сортування t-Sort від TompkinsRobotics [3]

Дана роботизована система сортування є гнучкою, адже легко адаптується до змінливої продуктивності шляхом заміни або перепрограмування мобільних роботів, зокрема їх траєкторії, вантажопідйомності, швидкодії тощо. Завдяки високій гнучкості компонування її можна без особливих труднощів інтегрувати в різні підприємства, навіть якщо ті мають обмежений простір або складне планування.

В літературі [3] зазначається що, сортування ОВ за певними критеріями є елементарною функцією логістики, яка відіграє важливу роль у більшості виробництв, складів і розподільних центрів. Сортування є, наприклад, неминучим, якщо в зоні комплектування застосовується групування та/або зонування для покращення продуктивності технологічних процесів. Для реалізації роботизованого сортування ОВ можуть використовуватись різні роботизовані системи на їх основі. Роботизовані системи сортування, однак, є

одними з останніх інновацій у сфері складського зберігання і тому нерідко використовуються на практиці, особливо в умовах невеликих або середніх підприємств. Водночас зростання вимог до ефективності та швидкості обробки продукції стимулює підприємства та фабрики до впровадження роботизованих систем сортування у найближчому майбутньому та навіть зараз. Для більшої наочності розглянемо на рис.1.4 схему системи роботизованої системи сортування з однією станцією завантаження.

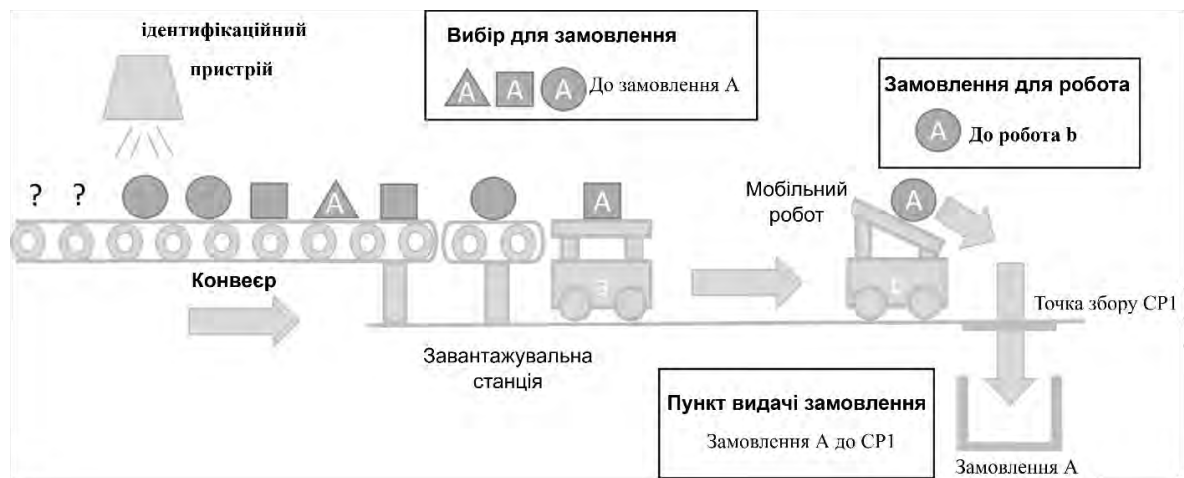


Рис 1.4. Схематичне зображення роботизованої сортувальної системи та її основні операційні завдання [3]

Серед відомих на сьогодні ПР, які використовуються для автоматизації як окремих технологічних операцій, у тому числі сортування ОВ, так і технологічних процесів виробництва в цілому, в тому числі в машино- та приладобудуванні особливої популярності набули універсальні промислові роботи.

Особливою популярністю користуються такі моделі ПР, як IRB 4600 [2] виробництва компанії АВВ, яка є одним із світових лідерів у галузі промислової робототехніки та автоматизації. Роботи цієї серії відзначаються високою швидкістю, компактністю, точністю позиціонування та широкими можливостями інтеграції в різноманітні виробничі процеси. Так ПР IRB 4600 забезпечує можливість створення більш компактних виробничих комірок та

роботизованих технологічних комплексів (РТК) з підвищеною продуктивністю та порівняно вищою якістю. Вказане дозволяє підвищити продуктивність. ПР IRB 4600 має нову компактну та оптимізовану конструкцію, що призводить до зниження ваги - це дозволяє скоротити виробничий цикл до 25% і досягти найкращій швидкості виконання завдання у своєму класі. Завдяки малій площі, компактній поворотній основі, вузькому ліктю, невеликим розмірам рук і зап'ястя, ПР IRB 4600 є найкомпактнішим у своєму класі. Це дозволяє розміщувати його ближче до обладнання, зменшуючи габарити виробничої комірки та підвищуючи ефективність і продуктивність.

ПР моделі IRB 4600 може використовуватись у приміщеннях до яких висуваються підвищенні вимоги щодо чистоти, адже він має герметичну конструкцію, що запобігає витoku мастила та знижує рівень забруднення приміщення. Робот відповідає стандарту ISO 14644-1 класу 5, що робить його ідеальним для виробничих умов, що потребують мінімізації забруднення [2]. Зовнішній вигляд ПР моделі IRB 4600 наведено на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд ПР моделі IRB 4600 [2]

Крім застосування для автоматизації операцій сортування замовлень на складах, ПР активно використовуються й в інших сферах, зокрема на

логістичних об'єктах і розподільчих центрах, адже завдання сортування є актуальними також для багатьох виробничих та невиробничих сфер господарства країни. Наприклад, ПР використовуються для автоматизації сортування в центрах обробки поштових відправлень, де потрібна висока швидкість і точність розподілу поштових відправлень. У таких випадках пункти збору закріплюються не за окремими клієнтськими замовленнями, а за розподільчими центрами — так званими пунктами призначення, які обслуговують усіх клієнтів конкретного регіону. Оскільки кожен пункт призначення щодня приймає велику кількість відправлень, їхнє закріплення за відповідними пунктами збору, як правило, залишається незмінним протягом кількох місяців. У наступних підрозділах якраз детальніше розглянемо сортування в різних сферах.

1.2.1. Роботизовані системи сортування поштових відправлень та вантажів

Більшість автоматизованих систем сортування, таких як системи обробки багажу в аеропортах чи сортування поштових відправлень у розподільчих центрах, базуються на замкнених конвеєрах із нахиленими лотками. У таких системах лотки автоматично завантажуються на станціях подачі вантажу та нахиляються у відповідний момент, коли досягають контейнера, призначеного для конкретного пункту призначення. У даному випадку буде розглянуто роботизовану систему сортування з дворівневою конфігурацією, де роботи пересуваються по верхньому рівню (мезоніну) та здійснюють сортування посилок від станцій завантаження (вхідних точок) до вихідних пунктів, використовуючи спіральні конвеєри, які з'єднані з роликовими контейнерами, розміщеними на нижньому рівні.

Так у роботі [4] вказується що, за останнє десятиліття на складах було впроваджено багато роботизованих систем для поповнення запасів, збору замовлень, пакування та навіть доставки. Сортування — це нове застосування

роботизованих автономних транспортних засобів у внутрішній логістиці, яке було реалізовано багато разів, наприклад як: Amazon представила роботів для виконання сортування Xanthus і Pegasus (США) на рис. 1.6 і рішення t-sort від Tompkins (США).

Порівняно з автоматизованою конвеєрною системою сортування, роботизована система сортування (RSS) має більш гнучку структуру, оскільки точки входу та виходу можна легко змінити шляхом модифікації керуючого програмного забезпечення, і вона забезпечує більшу масштабовану пропускну здатність шляхом додавання або вилучення роботів. Крім того, організація пунктів висадки на платформі може заощадити багато площі та ще більше зменшити кількість робочої сили.



Рис. 1.6. Роботи Xanthus і Pegasus від Amazon [4]

Виходячи з досвіду дослідження роботизованої системи сортування (RSS) у розподільчому центрі Derpon Express у Шанхаї, описаному в роботі [4] стає очевидно, що розподіл вхідних посилок між станціями завантаження є суттєвим викликом для забезпечення ефективної роботи системи. З одного боку, це впливає на час очікування посилок на станціях, з іншого — безпосередньо визначає маршрут і тривалість переміщення роботів по сортувальній платформі, що, в свою чергу, позначається на загальній продуктивності системи.

1.2.2. Роботизована система сортування сміття

На сьогоднішній день ні для кого не є секретом, що проблема екологічного забруднення потребує рішення. Як відомо зі статті [5] одна людина на протязі доби створює 3-5 літрів сміття, що в місяць становить близько 120 літрів і 15000 літрів за рік. В масштабах всього людства виходять колосальні числа. При цьому з'явилися такі шкідливі для екології матеріали як пластик, гума, поліетилен тощо, які в природі розкладаються від 100 років. Саме тому для їхньої утилізації застосовуються спеціальні технології. Але перед цим необхідно відсортувати їх. В основному цим займаються люди – сортувальники. Проте, як вказувалось раніше, ця робота є досить монотонною, а також шкідливою для здоров'я працівників з огляду на екологічні аспекти. Саме тому актуальною є автоматизація цього процесу.

Яскравим прикладом автоматизації процесу сортування сміття є технологічні лінії німецької компанії TitechGmbH [5].



Рис. 1.7. Сортувальна машина TitechGmbH [5]

На початку процесу сортування сміття подається транспортером до зони, де встановлені сенсори. Технологія сортування працює на основі опромінення матеріалів світлом видимого спектра (VIS) або інфрачервоним (NIR). Аналіз відбитого світла дозволяє визначити тип матеріалу за допомогою порівняння спектрів із базою даних. Після цього пневматичні модулі на кінці лінії

спрямовують струмінь стисненого повітря на ідентифіковані об'єкти, таким чином відсіюючи їх у відповідні потоки. Ширина робочої зони сканування однієї машини Titech в залежності від типорозміру становить від 600 до 2800 мм, забезпечуючи продуктивність від 14 до 130 т / год. [5]. Склад та принцип роботи лінії оптико-механічного сортування схематично наведено на рис. 1.8.

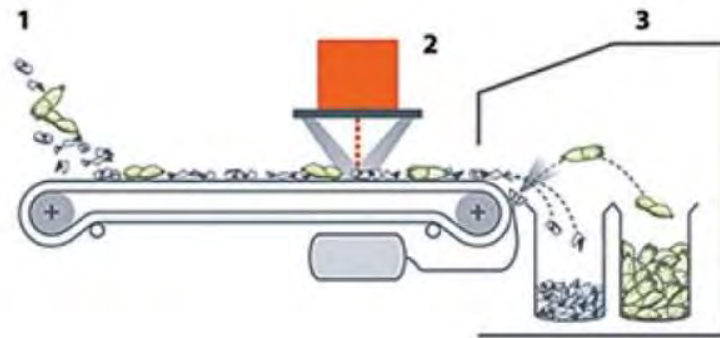


Рис.1.8. Склад та принцип роботи лінії оптико-механічного сортування:
1 – надходження сміття; 2 – область сенсорів; 3 – пневмомодулі для розподілення сміття по відповідних контейнерах [5]

Порівняння ефективності автоматичного і ручного сортування для різних матеріалів показує значну перевагу автоматичного методу сортування, особливо при відділенні паперу, скла та пластику. Так при автоматичному сортуванні продуктивність процесу сортування скла та паперу досягає показників 11000 – 12000 кг за годину, а пластику 3000 – 7000 кг за годину. У цілому система автоматичного сортування в змозі замінити собою роботу 20 – 60 робітників [5].

Таким чином, можна стверджувати, що автоматичне сортування має значні переваги над ручним методом, адже дозволяє обробляти більші об'єми відходів, знижуючи навантаження на працівників і мінімізуючи їх контакт із шкідливими речовинами тим самим зменшуючи вплив шкідливих умов праці на здоров'я працівників. Крім того, завдяки автоматизації зменшується кількість несортованого сміття, яке відправляється у повторну переробку, що сприяє зменшенню забруднення навколишнього середовища [5].

1.2.3. Використання сортувальних роботів у різних галузях промисловості

На сьогоднішній день ПР знаходять широке застосування в різноманітних галузях промисловості. У літературі [6] наведено огляд найбільш поширених сфер їх використання, де автоматизація процесу сортування є особливо ефективною та доцільною.

1. *Роздрібна торгівля та складування.* В літературі [6] вказується, що роздрібні розподільчі центри та склади електронної комерції обробляють величезні обсяги різноманітних товарів, які необхідно точно сортувати для виконання онлайн-замовлень, поповнення запасів магазинів та відправки до оптових торгових точок. Роботизовані системи сортування пропонують складну ідентифікацію товарів та ефективні можливості сортування для направлення продуктів, одягу, книг, електроніки та іншого до відповідних пунктів призначення. Роботизовані маніпулятори з адаптованими захоплювальними пристроями, розташовані вздовж конвеєрних ліній, у поєднанні з автоматизованими системами зберігання та вилучення, здатні виконувати завдання збирання, пакування та палетування товарів відповідно до пріоритетів доставки, графіків відправлення вантажівок та вимог торгових точок. Замість обробки окремих потоків, система забезпечує динамічне сортування продукції одночасно в декілька контейнерів, призначених для конкретних місць призначення. Такий підхід дозволяє значно скоротити витрати на персонал і зберігання запасів. Завдяки швидкості обробки сотень одиниць на годину, роботизоване сортування звільняє працівників від інтенсивних фізичних навантажень, дозволяючи їм зосередитися на обслуговуванні клієнтів з доданою вартістю.

2. *Поштові послуги та кур'єрська логістика.* В літературі [6] вказується Поштові служби та кур'єрські компанії, які ми вже розглядали вище, щодня обробляють величезні обсяги пошти та посилок, які повинні проходити високошвидкісне сортування, щоб дотримуватися обіцяних термінів доставки в усі регіони. Спеціалізовані сортувальні роботи здатні з

високою надійністю зчитувати адреси, поштові індекси, маршрутні етикетки та друковані коди сортування зі швидкістю до 6000 одиниць на годину. У порівнянні з ручною працею, роботизована автоматизація демонструє значно вищу продуктивність, стабільність і точність, а також суттєво знижує експлуатаційні витрати. Завдяки своїй гнучкості такі системи здатні ефективно реагувати на пікові навантаження, наприклад, у святкові періоди, як-от Різдво, зменшуючи стрес для працівників і водночас забезпечуючи своєчасне виконання логістичних операцій.

3. *Їжа та відходи.* В літературі [6] вказується для фруктів, хлібобулочних виробів, молочних продуктів та напоїв з коротким терміном придатності терміни доставки є суворими. Інтелектуальне роботизоване сортування інтегрується з програмним забезпеченням для управління запасами та сенсорними технологіями, щоб належним чином групувати швидкопсувні продукти за терміном придатності, ваговим класом, стиглістю тощо, щоб зменшити відходи та трудовитрати.

Також в роботі [6] вказується, що роботи для розливу напоїв можуть маніпулювати пляшками за допомогою захоплювальних важелів, спорожняючи коробки на конвеєри. Після сканування кодів та вимог до зберігання роботи сортують напої на піддони, готові до роздрібної торгівлі, стелажі для зберігання або спеціальні пакети для консолідації відправлень, таких як вина для ресторанів та барів.

4. *Автомобільне виробництво.* В літературі [6] вказується, що Автомобільна промисловість потребує гнучкої автоматизації, здатної адаптуватися до індивідуальних вимог складання транспортних засобів на замовлення. Роботизовані системи ефективно виконують завдання швидкого вибору та точного встановлення сидінь, консолей, електронних модулів і додаткових компонентів у кузови автомобілів, що рухаються по складальній лінії, забезпечуючи високу точність і відповідність кожному конкретному замовленню.

Також в роботі [6] вказується, що завдяки високій маневреності в обмежених просторах, інтелектуальні роботи здатні оптимізувати послідовність складання для підвищення продуктивності, а також точно прокладати кабелі та трубопроводи, запобігаючи їх перехрещенню чи зіткненням. Паралельно здійснюється безперервний моніторинг запасів деталей, що дозволяє вчасно доставляти потрібні компоненти для реалізації визначених конфігурацій.

Хоча управління роботами здійснюється за допомогою програмного забезпечення, сучасні візуальні системи зі зворотним зв'язком та елементами штучного інтелекту забезпечують контроль якості у режимі реального часу. У перспективі такі технології можуть дозволити гнучку персоналізацію інтер'єру безпілотних автомобілів з урахуванням індивідуальних вподобань водіїв шляхом використання адитивного виробництва [6].

5. *Фармацевтика та лабораторії.* В літературі [6] вказується, що у фармацевтичних лабораторіях контролю якості та дослідницьких центрах ключову роль відіграє точне відстеження зразків і мінімізація ризиків забруднення. Автоматизовані сортувальні системи забезпечують високу точність під час розподілу надзвичайно малих, але активних об'ємів рідин у флакони або планшети завдяки піпетуванню з високою точністю. Роботи-переміщувачі оперативно транспортують чутливі до температури матеріали — ферменти, клітинні культури та тканини — між лабораторними установками, такими як водяні бані чи центрифуги. Водночас автоматизовані системи у фармацевтичних аптеках сортують і точно маркують дози в блістерних упаковках.

Завдяки зниженню ймовірності помилок і скороченню ручної обробки, роботизоване сортування допомагає зберігати відповідність стандартам процедурної безпеки, захищає персонал від біологічних ризиків і зменшує втрати ресурсів у випадку невдалих експериментів, пришвидшуючи таким чином процес розробки нових лікарських засобів [6].

1.2.4. Розвиток робототехніки в Україні.

На сьогоднішній день розвиток робототехніки в Україні не стоїть на місці і все більше підприємств автоматизують своє виробництво за допомогою ПР. Проте із роботи [7] відомо, що розвиток робототехніки в Україні, знаходиться на початковому рівні. Власне виробництво ПР в Україні не розвинене, саме тому підприємства змушені закупати ПР із закордону. У зв'язку з цим очевидно, що питання налагодження власного виробництва ПР актуальне як ніколи.

1.3. Формулювання вимог до розроблюваного промислового робота для реалізації процесу роботизованого сортування об'єктів виробництва

Передбачається, що розроблюваний у даній роботі макет ПР буде призначений для автоматизації процесу сортування ОВ машино- та приладобудування, зокрема: сортування дрібних та середніх деталей, захоплення, розпізнавання та переміщення ОВ у межах заданої робочої зони.

ПР буде орієнтований на інтеграцію в автоматизовану виробничу лінію з урахуванням компактності, швидкодії та точності. Конструкція розроблюваного ПР повинна забезпечувати гнучкість до переналагодження для забезпечення можливості роботи з різною номенклатурою виробів. Очевидно, що такий ПР повинен працювати в кутовій (ангулярній) системі координат (СК) та у складній сферичній СК, або СК "SCARA" (рис. 1.2., г, д). Технологічні можливості та конструктивні особливості таких ПР визначаються рядом наступних ключових параметрів: вантажопідйомністю, числом ступенів рухомості, формою і розмірами робочої зони та ін.

Процес синтезу структури ПР може складатися з декількох етапів [8]:

I етап – **аналіз ОВ, що підлягають роботизованому сортуванню**. На цьому етапі здійснюється аналіз та формалізований опис ОВ.

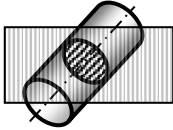
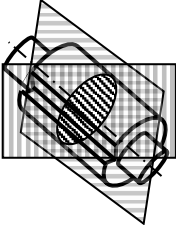
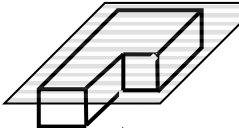
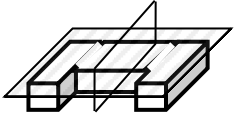
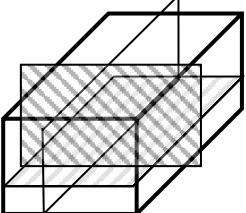
II етап – **визначення складу та траєкторії рухів ОВ**. На цьому етапі здійснюється формалізований опис початкових та кінцевих положень ОВ при його роботизованому сортуванні з огляду на особливості технологічних процесів та іншого технологічного обладнання. Одночасно визначаються етапи автоматичного сортування.

III етап – **аналіз ПР**. На цьому етапі для реалізації визначених рухів та положень ОВ при його роботизованому сортуванні визначаються відповідні функції ПР, здійснюється їх формалізований опис та визначається склад та траєкторія рухів захватного пристрою ПР відповідно визначеним переміщенням ОВ, а принцип дії та конструктивні особливості – конструктивним особливостям та фізико-механічним властивостям ОВ [8].

1.3.1. Формування вимог до об'єктів виробництва, що до їх роботизованого сортування

Хоча об'єкти, що підлягають роботизованому сортуванню характеризуються різноманітними конструкторсько-технологічними ознаками, але важливим є визначення спільних для них технології роботизованого сортування. При цьому велике значення мають кількість можливих положень ОВ та способи переведення його із одного положення у інше, іншими словами склад та траєкторія рухів як власне ОВ так і захватного пристрою ПР. Тому важливими є ознаки, що в сукупності дають змогу визначати склад та траєкторію рухів ОВ, послідовності їх виконання та орієнтовані положення, тобто елементи технології сортування ОВ в цілому. Такими ознаками є ознаки симетричності та форми ОВ, а також наявність конструктивних елементів, за якими можна оцінювати правильність та точність сортування. Ознаками симетричності виступають ознаки наявності та кількості осей обертання і площин симетрії ОВ, а також їх взаємне розташування [8].

Класифікаційні ознаки фасети Φ_c „Симетричність” [8]

Наявність осей обертання та площин симетрії			Приклади ОВ	
кількість		взаємне розташування осей та площин симетрії	схема	представники
осей обертання	площин симетрії			
1	безліч	площини симетрії проходять через вісь обертання		—
1	1	площина перпендикулярна до осі		— гладкі валики; — втулки; — ступінчасті валики з однаковими кінцями
1	2	одна площина проходить через вісь симетрії, паралельно до неї, друга площина — перпендикулярна осі		— симетричні валики з лисками, канавками, прорізами; — розрізні втулки; — симетричні валики з отворами, що перетинаються з віссю; — диски з отворами та шпонковими канавками тощо
1	1	площина проходить паралельно вісі симетрії		— несиметричні ступінчасті валики з розрізами по торцю; — фланці з отворами або інші ОВ ступінчастої форми з привареними вушками
відсутні	1	—		— корпуси механізмів тощо
відсутні	2	площини взаємно перпендикулярні		— опори; — важелі тощо
відсутні	3	площини взаємно перпендикулярні		— плитки; — балки тощо

З урахуванням наведених вимог, об'єкти виробництва (ОВ), що підлягають роботизованому сортуванню, повинні відповідати певним критеріям, які забезпечують ефективність процесу автоматичної обробки [8]:

- ОВ повинні мати геометричну симетрію, зокрема наявність осей та площин симетрії, а також передбачуване взаємне розташування цих елементів;
- їхня форма має відповідати заздалегідь визначеному геометричному типу, наприклад, циліндрична, призматична чи інша стандартизована;
- ОВ можуть містити зовнішні або внутрішні конструктивні елементи, що впливають на спосіб захоплення або орієнтування;
- допускається наявність феромагнітних, електродинамічних або відбиваючих властивостей, що можуть використовуватись для сенсорної ідентифікації.

1.4. Мета та завдання дипломного проекту

На основі вище вказаного, очевидно, що розвиток сучасного виробництва, у тому числі машино- та приладобудування, передбачає використання різноманітних ПР для автоматизації технологічної операції сортування ОВ. В Україні розвиток виробництва ПР, у тому числі для автоматизованого сортування, знаходиться на надзвичайно низькому рівні і вітчизняні виробники змушені імпортувати ПР для роботизації різних технологічних операцій і процесів, у тому числі для сортування ОВ. Тому актуальність теми дипломного проекту є очевидною.

Метою дипломного проекту є розробка макету промислового робота, зокрема його апаратного забезпечення для реалізації процесу роботизованого сортування об'єктів виробництва машино- та приладобудування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Провести аналітичний огляд сучасного стану засобів автоматизованого та / або роботизованого сортування ОВ у різних галузях господарства;

2. Обґрунтувати необхідність розробки засобів апаратного забезпечення процесу роботизованого сортування ОВ машино- та приладобудування та сформулювати вимоги до нього;
3. Визначити класифікаційні ознаки ОВ за якими здійснюватиметься їх розпізнавання та роботизоване сортування;
4. Розробити структурну схему процесу роботизованого сортування та кінематичну схему макету ПР, а також визначити основні параметри макету ПР для автоматизованого сортування ОВ;
5. Розробити схему електричну принципову автоматизованого керування макетом ПР для автоматизованого сортування ОВ;
6. Виконати експериментальні дослідження та апробацію працездатності макету ПР для автоматизованого сортування ОВ
7. Оцінити економічну ефективність упровадження роботизованої системи на підприємстві.

2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ РОБОТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ

2.1. Розробка структурної схеми системи керування маніпулятором промислового робота

Автоматизована система сортування об'єктів виробництва (ОВ) — це система, призначений для автоматичного розподілу об'єктів за визначеними критеріями, зокрема за формою, розміром, матеріалом тощо. Така система є невід'ємною частиною сучасних виробничих ліній і роботизованих комплексів, де вона виконує функцію точного та швидкого сортування продукції в рамках різноманітних технологічних процесів.

Основою системи становить маніпуляційний механізм, що включає базу (стаціонарну або рухому), набір кінематичних ланок, з'єднаних шарнірами, приводи (в основному сервоприводи) для приведення в рух, а також виконавчий пристрій для взаємодії з об'єктами. Робота системи починається з програмного задання алгоритму сортування. Сенсорні модулі визначають параметри об'єктів, після чого інформація надходить до мікроконтролера, який аналізує її та керує діями механізмів сортування. Усі процеси виконуються у режимі зворотного зв'язку, що дає змогу досягти високої точності.

Застосування автоматизованої системи сортування забезпечує суттєве підвищення продуктивності, зниження кількості помилок, покращення умов праці та зменшення участі людини у шкідливих і рутинних процесах. Крім того, система відзначається гнучкістю — її можна легко адаптувати до нових завдань і типів продукції шляхом перепрограмування. Усе це робить автоматизовані сортувальні комплекси важливим компонентом сучасного високотехнологічного виробництва.

Структурна схема автоматизованої системи сортування об'єктів виробництва (ОВ) відображає логічну організацію її основних

функціональних компонентів і взаємозв'язків між ними (рис. 2.1). Вона є основою для розуміння принципу роботи системи, забезпечення точного сортування продукції та подальшого проектування й оптимізації. Чітке уявлення про структуру дозволяє ефективно організувати процес автоматизації, забезпечити гнучкість та надійність у виробничих умовах.

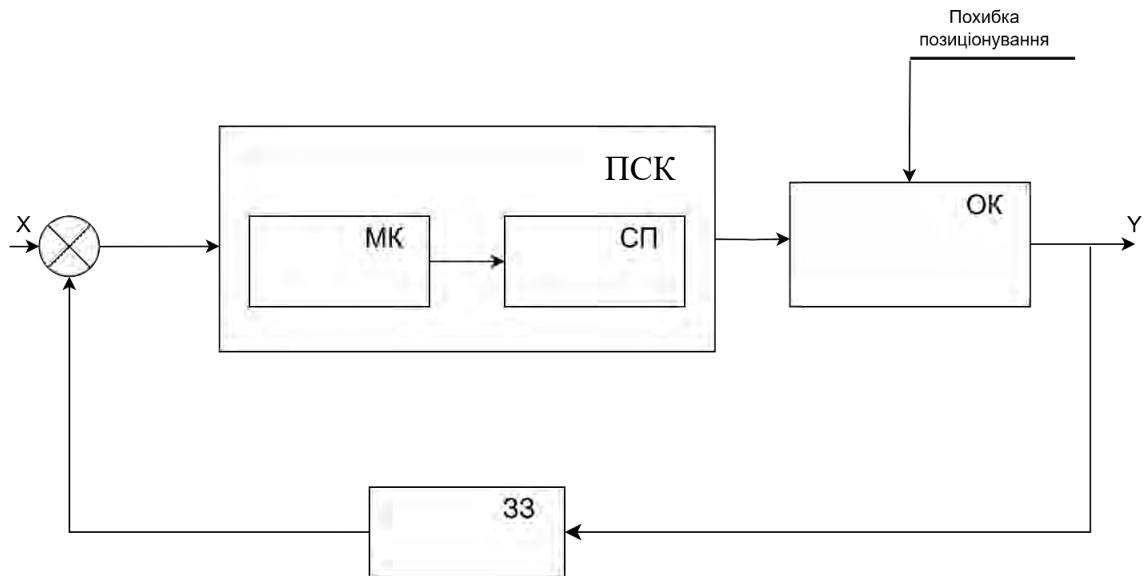


Рис. 2.1. Структурна схема системи автоматичного керування маніпулятором
ПР

Запропонована структура автоматизованої системи сортування об'єктів виробництва (ОВ) забезпечує можливість, захоплення окремих предметів на малих відстанях для подальшого сортування відповідно до заданих критеріїв. На рис. 2.1. показано яким чином працює система автоматичного керування маніпулятором та які чинники можуть впливати на його роботу. Основний процес обробки команди, заданої користувачем, виконується в підсистемі керування (ПСК) де після обробки, команда передається на об'єкт керування (ОК), який у свою чергу виконує задану команду, після чого потрапляє в зворотній зв'язок (ЗЗ) тим самим замикаючи коло системи керування маніпулятором. На ОК впливають зовнішні чинники такі як: тертя у механічних вузла, люфти в з'єднаннях або механічні вібрації, стрибки напруги

джерела живлення тощо, що призводять до виникнення похибки позиціонування. Похибки позиціонування ПР являють собою відхилення отриманого результату від заданого на початку.

2.2. Розробка структурної схеми підсистеми керування системи автоматичного керування маніпулятором промислового робота

Для більш точного розуміння процесу роботизованого сортування ОВ доцільно зосередити увагу на детальному аналізі на ключовій складовій розроблюваної САК ПР, зокрема підсистеми керування (ПСК). ПСК відповідає за координацію дій виконавчих механізмів, обробку даних від датчиків кута повороту до інтерфейсу яким керує користувач та реалізацію необхідної послідовності рухів ПР при автоматичному сортуванні. Вона являє собою складну трирівневу систему, що об'єднує у своєму складі всі необхідні апаратні та програмні компоненти для забезпечення точного, стабільного та адаптивного функціонування роботизованого маніпулятора в процесі сортування об'єктів виробництва. Структурна схема ПСК наведена на рис. 2.2.

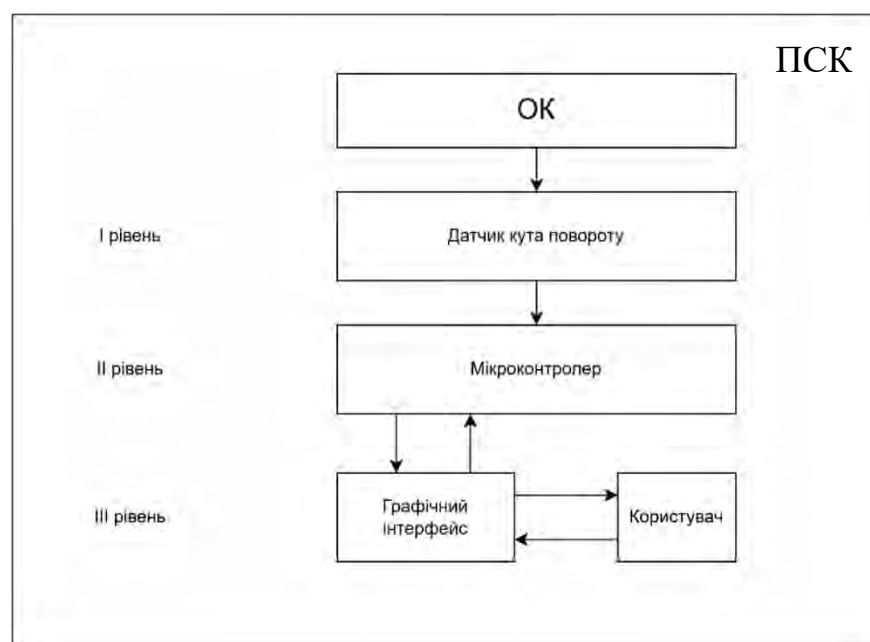


Рис. 2.2. Структурна схема підсистеми керування

Підсистема системи керування (ПСК) умовно поділяється на три взаємопов'язані рівні, які утворюють ієрархічну структуру для керування маніпулятором ПР.

На *нижньому рівні* (I рівень виконавчих механізмів) підсистема керування взаємодіє безпосередньо з сервоприводами, формуючи керуючі сигнали для руху ланок маніпулятора та зчитуючи інформацію про їхнє фактичне положення. Цей рівень відповідає за управління фізичними процесами.

Середній рівень (II рівень керування) виконує функції обробки вхідних сигналів, реалізації алгоритмів сортування та контролю за виконанням команд. На цьому етапі за допомогою мікроконтролера відбувається аналіз даних з сенсорів (сервоприводів), а також визначення необхідних траєкторій руху відповідно до логіки сортування.

Верхній рівень (III рівень користувацького інтерфейсу) забезпечує взаємодію користувача з системою. Тут реалізується подача команд, контроль за виконанням завдань та налаштування параметрів. Цей рівень створює умови для інтуїтивно зрозумілого керування всім процесом сортування.

Така організація структури СПК забезпечує ефективну координацію дій між усіма її функціональними елементами та дозволяє їй працювати узгоджено в реальному часі (рис. 2.2).

Принцип дії підсистеми керування ґрунтується на послідовності дій, який починається з дій користувача. Через графічний інтерфейс, який виконує роль зручного засобу взаємодії з технічною системою, користувач задає команду або набір параметрів, які описують необхідну операцію сортування. Ці команди надходять до мікроконтролера, який є центральним обчислювальним елементом системи. Він виконує обробку вхідної інформації, аналізує задані умови та генерує сигнали керування, що поступають на виконавчі механізми, у даному випадку сервоприводи. Сервоприводи застосовуються для переміщення ланок ПР (рис. 3.1) для виконання рушійних дій, аналогічних діям людини. Зокрема сервоприводи отримують сигнали від

МК у цифровій формі та перетворюють їх у механічні рухи відповідних валів, які фізично зв'язані із ланками ПР, змінюючи їх положення у тримірному просторі та / або затискання / розтискання захватного пристрою. У результаті ці рухи безпосередньо впливають на об'єкт керування, здійснюючи необхідну дію — наприклад, захоплення та переміщення деталі у відповідну зону сортування.

2.3. Аналіз об'єкта керування та розробка його параметричної моделі

Об'єктом керування (ОК) виступає маніпулятор ПР, який був розроблений на основі кінематичної схеми (рис 3.1).

Окрім загального опису структури системи керування, необхідно також детально розглянути ОК, який безпосередньо реагує на дії виконавчих органів. Ретельний аналіз ОК дозволяє зрозуміти, які саме фізичні величини впливають на нього у процесі функціонування, а також як змінюється його стан під дією вхідних сигналів, вихідних результатів і зовнішніх збурень.

Зокрема, слід зазначити, що на об'єкт керування діють вхідні сигнали, які представляють собою керуючі впливи (наприклад, подача сили, моменту або кутового прискорення), а також збурюючі фактори f_n що можуть негативно впливати на точність і стабільність роботи маніпулятора, зокрема, тертя у механічних вузла (f_1), люфти в з'єднаннях (f_2) або механічні вібрації (f_3), стрибки напруги джерела живлення (f_4) тощо. У свою чергу, вихідні сигнали y_m характеризують реакцію ОК, тобто зміну положення або орієнтації (y_1) ланок маніпулятора ПР в залежності від прикладених вхідних величин (x_k), а також зміну швидкості (y_2). Наявність функціональної залежності між усіма виходами та відповідними входами x_k (рис. 2.3) можуть розглядатись як канали впливу на ОК (рис. 2.3). На схемі (рис. 2.3) функціональний зв'язок між входами x_k та виходами y_m показані у вигляді прямих ліній, у тому числі пунктирними, зі стрілками [9].

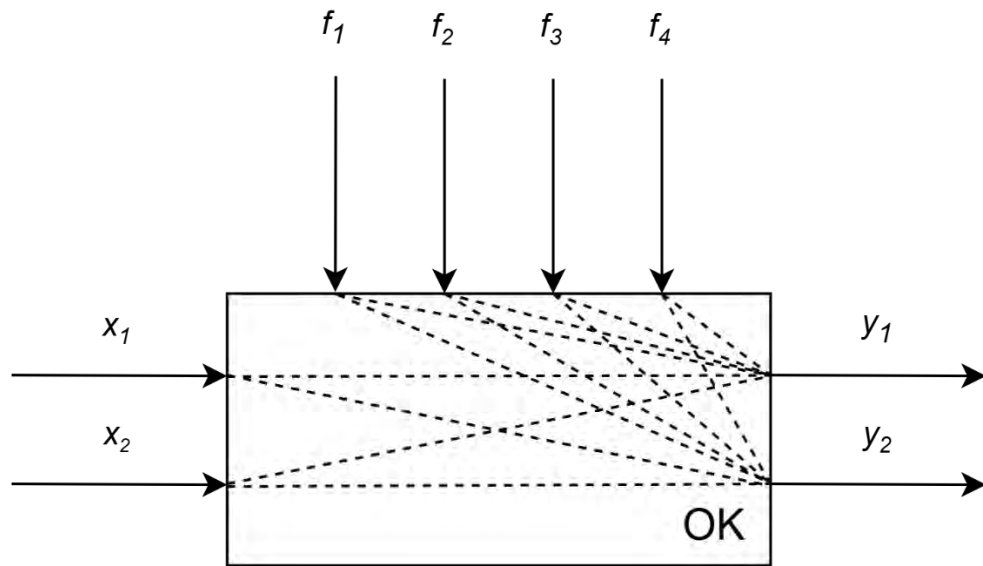


Рис. 2.3. Параметрична схема об'єкта керування

Формалізовано функціональний зв'язок між входами x_k , виходами y_m та збуреннями f_n , що впливають на ОК можна подати наступним чином.

Положення або орієнтації (y_1) ланок маніпулятора ПР залежать від прикладених до них вхідних величин, зокрема швидкості кута повороту, сила стискання, а також збурюючих факторів, таких як: тертя у механічних вузла, люфти в з'єднаннях, механічні вібрації, механічні вібрації. Формалізовано вказане можна подати наступним чином:

$$y_1 = F(x_1, x_2, f_1, f_2, f_3, f_4), \quad (2.1)$$

де y_1 – положення або орієнтація ланок маніпулятора ПР у тримірному просторі;

x_1 – швидкість кута повороту;

x_2 – сила стискання;

f_1 – тертя у механічних вузла;

f_2 – люфти в з'єднаннях;

f_3 – механічні вібрації;

f_4 – стрибки напруги джерела живлення;

$$y_2 = F(x_1, x_2, f_1, f_2, f_3, f_4), \quad (2.2)$$

де y_2 – положення або орієнтація ланок маніпулятора ПР у тримірному просторі;

x_1 – швидкість кута повороту;

x_2 – сила стискання;

f_1 – тертя у механічних вузла;

f_2 – люфти в з'єднаннях;

f_3 – механічні вібрації;

f_4 – стрибки напруги джерела живлення;

2.4. Висновки до розділу

У даному розділі було проведено комплексну розробку структурної організації автоматизованої системи сортування об'єктів виробництва, що є важливим етапом формування логічної архітектури керування маніпулятором ПР. Структурне моделювання дозволяє на високому рівні описати функціональні зв'язки між компонентами системи та визначити взаємодії між ними.

1) Розроблено структурну схему автоматизованої системи сортування ОБ, яка дозволяє візуалізувати логіку взаємодії між основними функціональними компонентами системи. Структурна схема виступає фундаментом для подальшого проєктування як апаратної частини роботизованого комплексу

2) Було розроблено структурну схему підсистеми керування, яка відповідає за координацію дій виконавчих механізмів, обробку даних від датчиків кута повороту до інтерфейсу яким керує користувач та реалізацію необхідної послідовності рухів ПР при автоматичному сортуванні.

3) Було проведено аналіз ОК та розроблено його параметричну модель. Розглянуто як безпосередньо ОК реагує на дії виконавчих органів. Ретельний аналіз ОК дозволяє зрозуміти, які саме фізичні величини впливають на нього у процесі функціонування, а також як змінюється його стан під дією вхідних сигналів, вихідних результатів і зовнішніх збурень.

У результаті виконаної роботи отримано цілісне уявлення про логіку функціонування автоматизованої системи сортування ОВ, визначено ключові взаємозв'язки між її компонентами та сформовано базу для реалізації схем керування і моделювання поведінки ОК у режимів роботи.

3. РОЗРОБКА КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

3.1. Загальне поняття про розроблювану кінематичну схему маніпулятора промислового робота

Одним з перших завдань, яке стоїть перед розробкою ПР, є вибір його кінематичної схеми — тобто структури «скелета» пристрою. У більшості випадків, виконуючи маніпуляції з об'єктами, робот імітує рухи людської руки (рис 3.1).

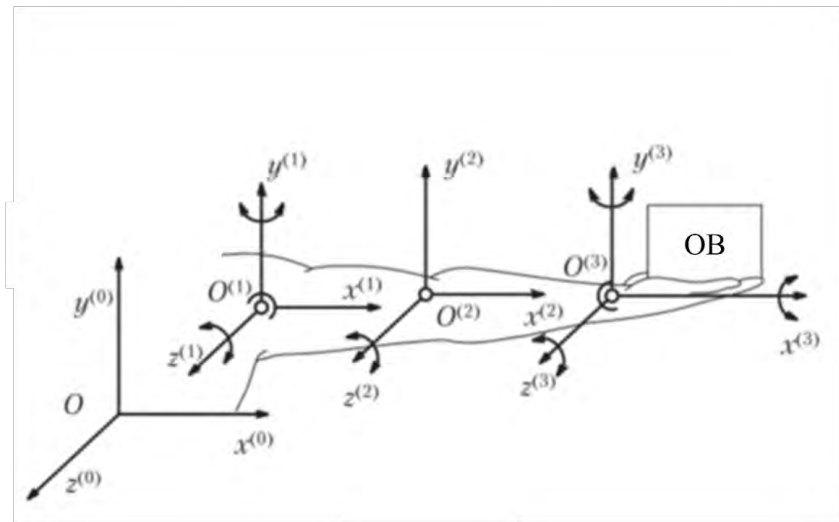


Рис.3.1. Візуальне зображення кінематичної схеми руки людини

З огляду на те, що маніпулятор ПР імітує рушійні функції руки людини при розробці кінематичної схеми допускається використання біологічних термінів. Так, переміщення ланок маніпулятора ПР вздовж осей абсолютної декартової системи координат (рис. 3.2) аналогічно до переміщення руки людини (рис. 3.1) можна реалізувати певним просторовим кінематичним ланцюгом, утвореним із окремих кінематичних пар (рис. 3.1). При цьому нерухома ланка 0 маніпулятора ПР, що закріплена на нерухомій стійці, буде виступати аналогом людської лопатки в плечовому суглобі (рис. 3.1). Порядок аналізу руху кінематичних пар ланок маніпулятора ПР починається від

нерухомої ланки 0 до захватного механізму 4, який виконує функції зап'ястя або кисті людини при захваті та утриманні ОВ. Зап'ястя (кисть) утворюється послідовним з'єднанням певних ланок і призначене для захвату, утримання та повороту ОВ в тримірному просторі відносно осей обертання на відповідні кути.

На рис. 3.2 в якості прикладу зображено кінематичну схему маніпулятора ПР. Дана кінематична схема містить різні кінематичні пари, які з'єднуються в ланки (рис. 3.2). У даному випадку кінематична схема представлена трирухомою парою та містить *A*-ланку 1 (так зване плече), однорухомою парою, яка містить *B*-ланку 2 (так зване передпліччя); трирухомою парою, яка містить *C*-ланку 3 (так звану кисть) (рис. 3.2).

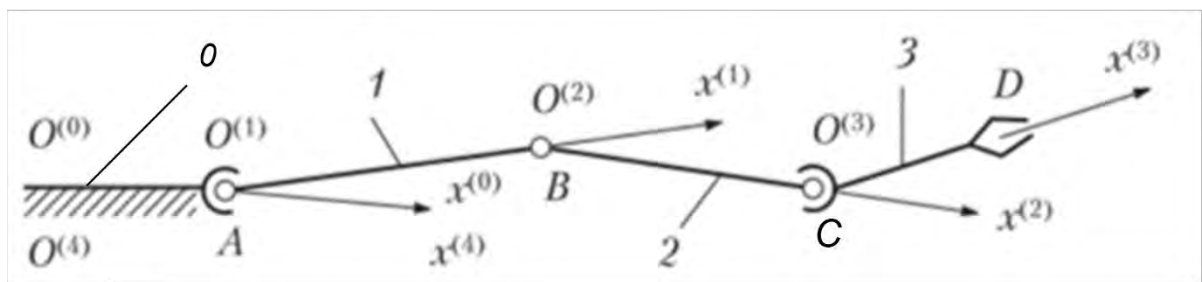


Рис.3.2. Кінематичний вигляд руки людини

Робот, маніпулятор і зап'ястя зв'язують базову систему координат із системою координат інструмента. Розрізняються осі декількох типів. Вісь обертального руху являє собою таке з'єднання двох жорстких елементів, коли один з них може обертатися відносно іншого навколо фіксованої осі. Вісь поступального руху являє собою таке з'єднання двох жорстких елементів, коли один може рухатися прямолінійно по іншому елементу. Складне зчленування являє собою таке з'єднання двох жорстких елементів [11], коли один з них може обертатися відносно іншого навколо рухливої осі.

Відносні рухи ланок механічної системи промислового робота під дією яких реалізуються степені вільності, поділяються на три групи: орієнтуючі (локальні), транспортуючі (регіональні) і координатні (глобальні) [11].

- **Глобальні (координатні) рухи** — це рух усієї конструкції маніпулятора у просторі, що здійснюється за допомогою його мобільної бази або транспортної платформи. Такі рухи притаманні лише мобільним роботам. У стаціонарних маніпуляторах такі переміщення не реалізуються, оскільки їх основа жорстко фіксується на підлозі, стіні або стелі в безпосередній близькості до робочої зони. [11].
- **Регіональні (транспортуючі) рухи** — Це переміщення захватного пристрою в межах робочого простору маніпулятора, що обмежується довжиною його ланок та конструктивною будовою. Такі рухи забезпечують доступ маніпулятора до різних точок у межах встановленого радіуса дії. [11].
- **Локальні (орієнтуючі) рухи** — Це незначні переміщення захоплювача, співрозмірні з його власними габаритами, що включають зміну орієнтації або точне розташування в межах обмеженої ділянки. Такі рухи відіграють ключову роль на завершальному етапі роботи, наприклад, під час точного розміщення або укладання деталі. [11].

Метою даної роботи є розробка маніпулятора для автоматизованої системи сортування ОВ, який здатен працювати в широкому просторовому діапазоні. З огляду на це, необхідно було обрати таку кінематичну схему, яка забезпечувала б достатній радіус дії та гнучкість при виконанні сортувальних операцій. Як оптимальний варіант було запропоновано кінематичну схему шарнірного типу (рис. 3.2), що формує робочу зону у вигляді сфери, що є найефективнішим рішенням для сортування об'єктів різної форми та розміру в межах заданого робочого простору.

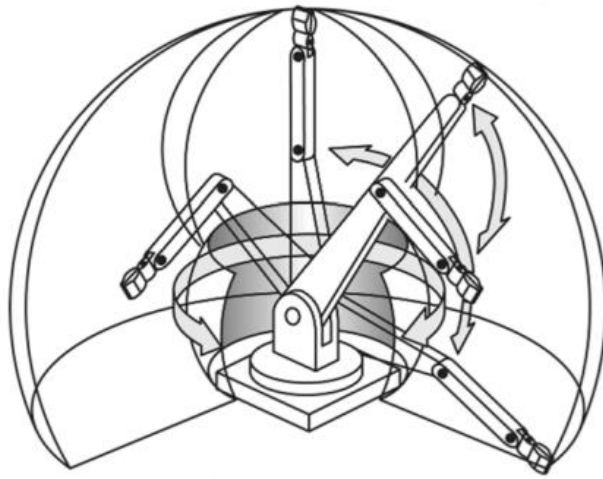


Рис. 3.2. Схема маніпулятора шарнірного типу [10]

3.2. Розробка кінематичної схеми маніпулятора промислового робота

Маніпулятор складається з бази та 3-х виконавчих ланок, захватного пристрою і п'ятих обертових кінематичних пар (рис. 2.3).

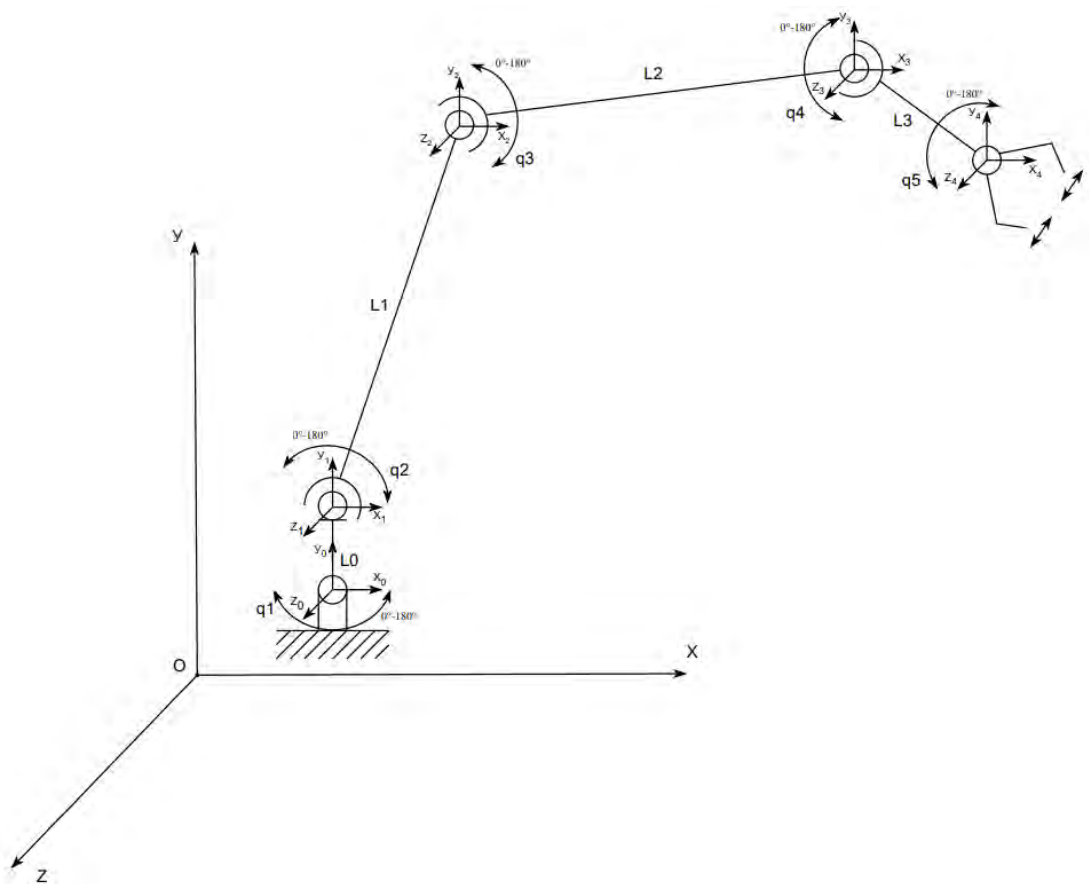


Рис. 3.2. Кінематична схема роботизованого маніпулятора

База (L_0) схематично зображена у формі циліндра який прикріплений до землі довжиною $L_0 = 56\text{мм}$, та виконує функцію так званої лопатки маніпулятора. База пов'язана з першою ланкою за допомогою з'єднання q_1 , що дозволяє всій конструкції рухатися у площини XOZ .

Ланка 1 (L_1) на схемі зображена вертикальним стержнем, та виконує функцію так званого плеча маніпулятора довжиною $L_1 = 120\text{мм}$. З обох сторін вона з'єднана обертовими кінематичними парами. Перша ланка може обертатися на кут q_2 , що дозволяє обертатися відносно осей XU . З іншої сторони рухома перша ланка кріпиться до з'єднання q_3 , що поєднує першу ланку з другою.

Ланка 2 (L_2) схематично зображає стержень та виконує функцію так званого передпліччя маніпулятора довжиною $L_2 = 96\text{мм}$, з правої та лівої сторони рухомо пов'язана з першою та третьою утворюючи кінематичні пари, відносно першої ланки. Друга ланка здійснює обертові рухи q_3 відносно осей XU .

Ланка 3 (L_3) схематично зображає стержень та виконує функцію так званого зап'ястя маніпулятора довжиною $L_3 = 30\text{мм}$, з однієї сторони рухомо пов'язана з другою ланкою, утворюючи кінематичну пару, а на кінці третьої ланки знаходиться захватний пристрій. Третя ланка здійснює обертові рухи q_4 відносно осей YZ .

Захватний механізм прикріплений до кінця третьої ланки та виконує функцію захоплення та утримання імітуючи пальці людини, довжиною від 80-125мм в залежності від того закритий чи відкритий захватний пристрій.

Кінематична схема маніпулятора промислового робота побудований на основі п'яти кінематичних пар, кожна з яких забезпечує лише один незалежний тип руху, тобто володіє однією ступеню свободи. Таким чином, виходячи з кількості кінематичних з'єднань та їхнього функціонального призначення, можна зробити висновок, що загальна кількість ступенів свободи цього маніпулятора становить $n = 5$. Це означає, що маніпулятор здатний

здійснювати п'ять незалежних переміщень, що визначають його просторову маневреність.

3.3. Розрахунок динамічних характеристик кінематичних пар маніпулятора промислового робота

Даний розрахунок спрямований на визначення величин переміщення трьох кінематичних пар маніпулятора — q_2 , q_3 та q_4 — у випадку, коли маніпулятор виконує рух до межі свого робочого простору. Це необхідно для перевірки працездатності виконавчих приводів у граничних режимах та аналізу їх динамічного навантаження. Відомо, що:

Граничні значення кутів становлять:

$$q_{2_{\max}} = 160^\circ,$$

$$q_{3_{\max}} = 130^\circ,$$

$$q_{4_{\max}} = 150^\circ.$$

Початкові значення кутів (нульова позиція):

$$q_{2_{\text{start}}} = 45^\circ,$$

$$q_{3_{\text{start}}} = 60^\circ,$$

$$q_{4_{\text{start}}} = 55^\circ.$$

Загальний час виконання руху — $t_{\text{рух}} = 3 \text{ с}$

Програмний закон руху по кожній з координат характеризується синусоїдальним законом змінення програмного прискорення [10]:

$$q''_n(t) = \varepsilon_n * \sin\left(\frac{2\pi}{t_{\text{рух}}} * t\right); \quad (3.1)$$

де ε_s - амплітуда прискорення. Математичними перетвореннями можна знайти закони змінення програмних швидкостей (2) та переміщень (3) [10]:

$$q'_n(t) = \varepsilon_n * \frac{t_{\text{пyx}}}{2\pi} (1 - \cos(\frac{2\pi}{t_{\text{пyx}}} * t)); \quad (3.2)$$

$$q_n(t) = q_{\text{start}} * \varepsilon_n * \frac{t_{\text{пyx}}}{2\pi} (t - \frac{t_{\text{пyx}}}{2\pi} - \sin(\frac{2\pi}{t_{\text{пyx}}} * t)). \quad (3.3)$$

Для знаходження амплітуди прискорення було використано формулу [10] (3.4):

$$\varepsilon_n = (q_{n_{\text{max}}} - q_{n_{\text{start}}}) \frac{2\pi}{t_{\text{пyx}}^2}. \quad (3.4)$$

Підставивши отримані значення кутів переміщення в синусоїдальний закон змінення програмного прискорення, та розбивши часовий інтервал руху $t_p = 3$ с на рівномірні проміжки з кроком 0,3 с, було обчислено значення кутів зміщення для кожної з трьох кінематичних пар: q_2 , q_3 та q_4 упродовж всього інтервалу руху. На основі розрахунків отримано діапазон змінення кутів для кожної координати, представлений у табличному вигляді:

- Таблиця 1 — зміна кута для кінематичної пари q_2 ;
- Таблиця 2 — зміна кута для пари q_3 ;
- Таблиця 3 — зміна кута для пари q_4 .

Для початку розрахуємо різницю між максимальним та стартовим кутом:

$$\Delta q_2 = 160^\circ - 45^\circ = 115^\circ$$

$$\Delta q_3 = 130^\circ - 60^\circ = 70^\circ$$

$$\Delta q_4 = 150^\circ - 55^\circ = 95^\circ$$

Тепер переведемо градуси в радіани:

$$\Delta q_2 = 115 * \frac{\pi}{180} = 2,007 \text{ рад/с};$$

$$\Delta q_3 = 70 * \frac{\pi}{180} = 1,222 \text{ рад/с};$$

$$\Delta q_4 = 95 * \frac{\pi}{180} = 1,658 \text{ рад/с};$$

Після цього підставимо отриманий результат в формулу (3.5):

$$\varepsilon_n = (\Delta q_n) \frac{2\pi}{t_{\text{пyx}^2}}. \quad (3.5)$$

Отриманий результат: $\varepsilon_2 = 1.4 \text{ c}^{-2}$, $\varepsilon_3 = 0.85 \text{ c}^{-2}$, $\varepsilon_4 = 1.16 \text{ c}^{-2}$

Після цього використовуючі формули (3.1), (3.2), (3.3) розрахуємо прискорення, швидкість та переміщення для кінематичних пар q2 (табл. 3.1), q3 (табл. 3.2) та q4 (табл. 3.3).

Таблиця 3.1

Числові дані прискорення, швидкості та переміщення з'єднання q2

<i>t, c</i>	<i>Приск., рад/с²</i>	<i>Швидк., рад/с</i>	<i>Переміщ., рад</i>
0	0	0	0,7854
0,3	0,8229	0,12766	0,79835
0,6	1,33148	0,46189	0,88301
0,9	1,33148	0,875	1,08373
1,2	0,8229	1,20924	1,40048
1,5	0	1,3369	1,78896
1,8	-0,8229	1,20924	2,17744
2,1	-1,33148	0,875	2,49420
2,4	-1,33148	0,46189	2,69491
2,7	-0,8229	0,12766	2,77958
3,0	0	0	2,79253

Таблиця 3.2

Числові дані прискорення, швидкості та переміщення з'єднання q3

<i>t, c</i>	<i>Приск., рад/с²</i>	<i>Швидк., рад/с</i>	<i>Переміщ., рад</i>
0	0	0	1,04720
0,3	0,49962	0,07751	1,05508
0,6	0,80831	0,28043	1,10662
0,9	0,80831	0,53126	1,22879
1,2	0,49962	0,73418	1,4216
1,5	0	0,81169	1,65806
1,8	-0,49962	0,73418	1,89453
2,1	-0,80831	0,53126	2,08734
2,4	-0,80831	0,28043	2,20951
2,7	-0,49962	0,07751	2,26102
3,0	0	0	2,26893

Таблиця 3.3

Числові дані прискорення, швидкості та переміщення з'єднання q4

t, c	$Приск., рад/с^2$	$Швидк., рад/с$	$Переміщ., рад$
0	0	0	0,95993
0,3	0,68183	0,10578	0,97063
0,6	1,10323	0,38271	1,04057
0,9	1,10323	0,72501	1,20638
1,2	0,68183	1,0019	1,46805
1,5	0	1,10772	1,78896
1,8	-0,68183	1,00194	2,10988
2,1	-1,10323	0,72501	2,37155
2,4	-1,10323	0,38271	2,53735
2,7	-0,68183	0,10578	2,60730
3,0	0	0	2,61799

Після проведених обчислень прискорень, швидкостей та переміщень для кожного кінематичного з'єднання, доцільно для наочності відобразити залежність отриманих чисельних значень від часу руху маніпулятора у вигляді графіків. Це дозволить краще зрозуміти динаміку руху кожної з кінематичних пар. Відповідні графічні залежності наведено для: q2 (рис. 3.3), q3 (рис. 3.4), q4 (рис. 3.5).

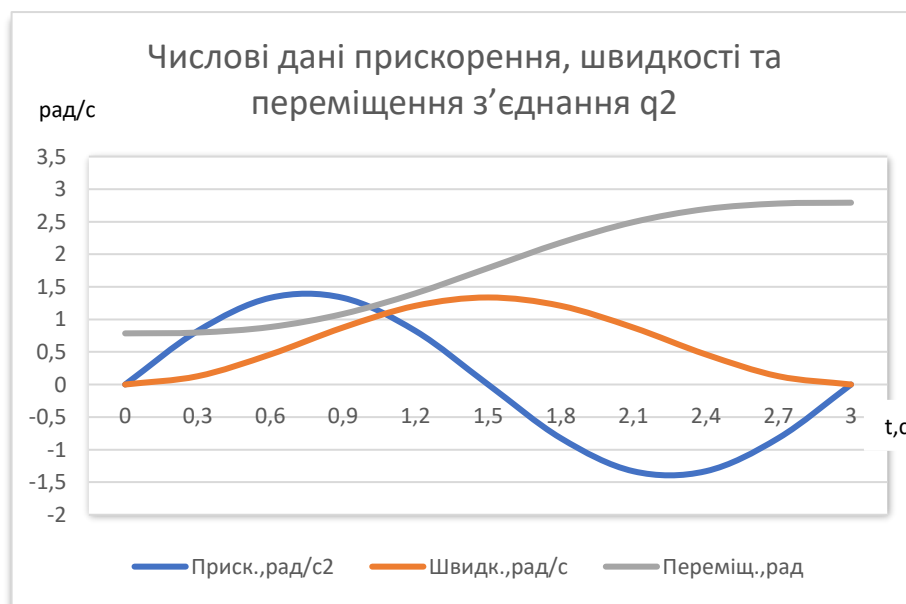


Рис. 3.4. Графіки прискорення, швидкості та переміщення другої кінематичної пари

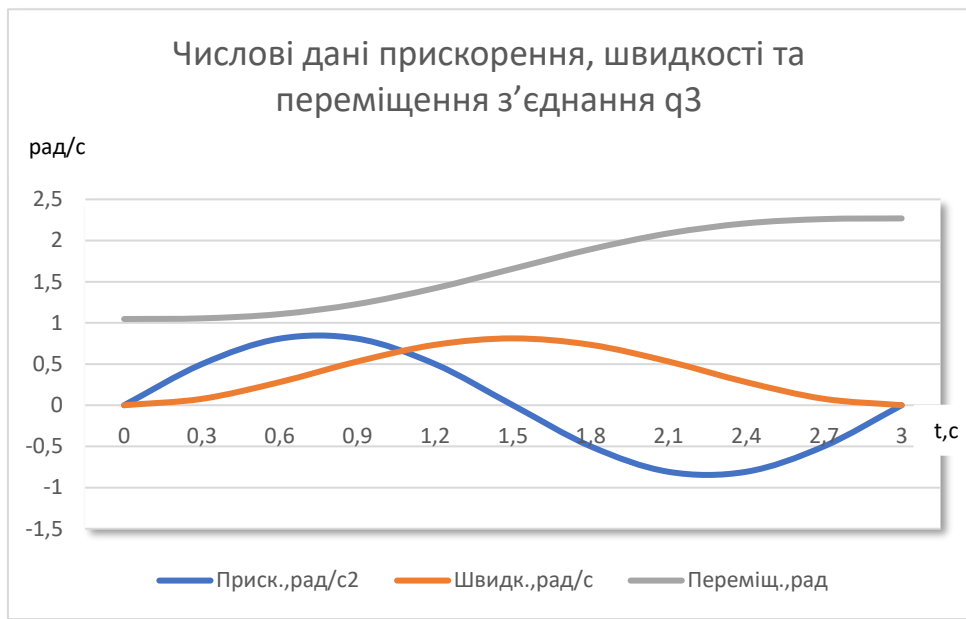


Рис. 3.5. Графіки прискорення, швидкості та переміщення третьої кінематичної пари

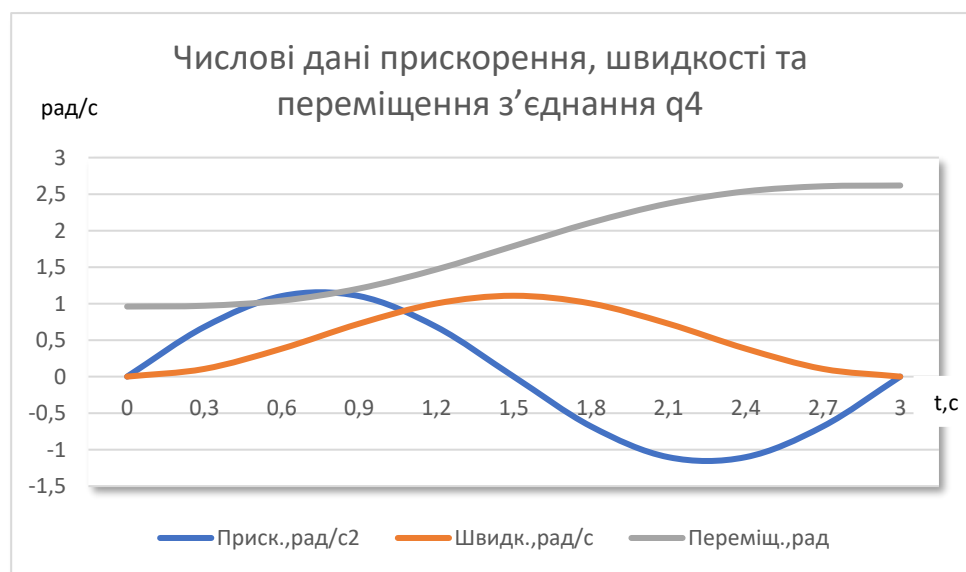


Рис. 3.6. Графіки при Графіки прискорення, швидкості та переміщення четвертої кінематичної пари

Як видно з отриманих графіків, залежність прискорення від часу має форму, близьку до синусоїдальної кривої. Це відповідає закладеному синусоїдальному закону програмного прискорення. У свою чергу, графік кутової швидкості нагадує косинусоїдальну криву, де чітко простежується

поступове нарощування швидкості до максимуму, після чого відбувається її зменшення до нуля. Графік переміщення демонструє монотонне зростання, що вказує на сталість спрямованості руху маніпулятора протягом усього заданого проміжку часу. Така форма траєкторії переміщення є характерною для ПР.

Отримані числові значення кутових швидкостей у процесі руху є ключовими параметрами для вибору виконавчих приводів. На їх основі можна точно визначити технічні вимоги до двигунів, що забезпечуватимуть рух кожної з кінематичних пар маніпулятора з урахуванням необхідної динаміки та навантаження. Таким чином, результати цього етапу розрахунків є важливою основою для проєктування надійної та ефективної привідної системи роботизованого пристрою.

3.4. Висновки до розділу

1. Проведено аналіз типових кінематичних схем маніпуляторів та обґрунтовано доцільність вибору кінематичної схеми розроблюваного макету маніпулятора ПР, що імітує рухи руки людини. Це дозволяє забезпечити захоплення та переміщення різних ОВ машино- та приладобудування при їх автоматичному сортуванні даним ПР.

2. Розроблено кінематичну схему розроблюваного макету маніпулятора ПР, у якій визначено кількість ланок, види та кількість кінематичних з'єднань, а також геометричні параметри основних елементів: довжину бази, робочих ланок та захватного пристрою. Вибрана структура дозволяє забезпечити маніпулятору необхідно.

3. Проведено розрахунок динамічних характеристик маніпулятора ПР для його трьох основних кінематичних пар маніпулятора — другої, третьої та четвертої. Розраховано залежності прискорень, швидкостей і переміщень від часу, що дає змогу оцінити динамічні характеристики кожного з'єднання та забезпечити їх відповідність вимогам технологічного процесу сортування.

4. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ МАКЕТУ МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ

4.1. Розробка схеми електричної принципової керування сервоприводами

Схема електрична принципова – графічне зображення, за допомогою умовних графічних і буквено-цифрових позначень, зв'язків між елементами електричного пристрою. Зазвичай, при розробці радіоелектронного пристрою, процес створення схеми електричної принципової є проміжною ланкою між стадіями розробки функціональної схеми і проектуванням друкованої плати. Принципова електрична схема є своєрідною «картою» всіх електричних з'єднань електрообладнання. Використання принципової електричної схеми не тільки дає повне уявлення про проект, але і дозволяє на її основі створювати схеми окремих з'єднань, здійснювати розробку конкретних вузлів підключення. По цій же електросхемі проводиться перевірку правильності монтажу електрообладнання [12].

Для створення електричної принципової схеми програмованого робота маніпулятора першим етапом є ретельний вибір усіх необхідних компонентів, що будуть задіяні у його апаратній реалізації. Зокрема, головну роль у функціонуванні системи відіграють такі елементи, як мікроконтролер (який відповідає за обробку сигналів та реалізацію алгоритмів керування), сервоприводи (що виконують виконавчі рухи маніпулятора), а також з'єднувальні провідники й інші допоміжні елементи, що забезпечують електричну взаємодію між частинами схеми. Перед безпосереднім збиранням фізичного макета програмованого робота доцільно провести його попереднє віртуальне моделювання для перевірки працездатності логіки керування. З цією метою було обрано онлайн-симулятор Tinkercad, що дозволяє будувати електричні схеми, програмувати Arduino-пристрої та тестувати взаємодію з

сервоприводами у віртуальному середовищі. У цьому середовищі була реалізована схема підключення мікроконтролера до сервоприводів та перевірено базові алгоритми керування рухами (рис. 4.1). Такий підхід дозволяє виявити та усунути можливі помилки ще на етапі розробки, заощадивши час і ресурси при наступному складанні фізичного макету.

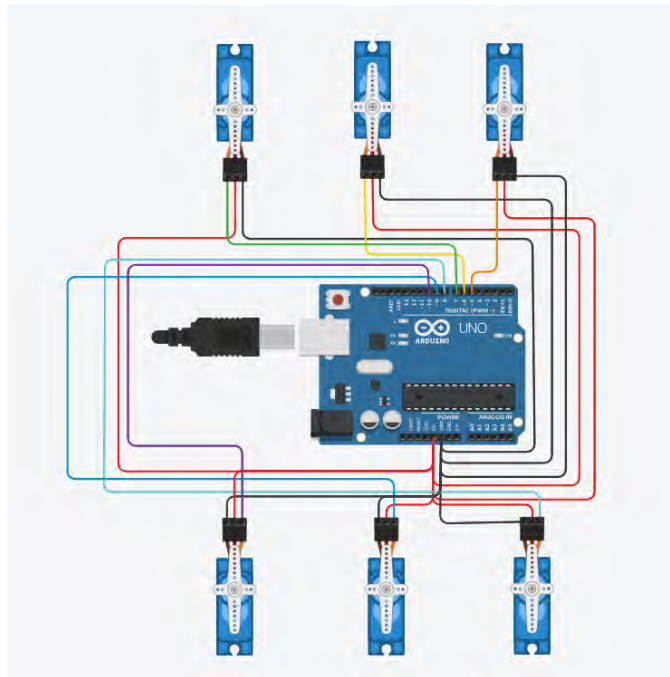


Рис. 4.1. Електрична схема керування сервоприводами

У цілому, принципова електрична схема даного маніпулятора має відносно просту структуру. Її основою є контролер Arduino, до якого підключено шість сервоприводів, що виконують рухові функції маніпуляторних ланок. Незважаючи на зовнішню простоту, для успішної реалізації проєкту в реальному середовищі необхідно ретельно підібрати кожен компонент схеми, з урахуванням технічних характеристик, сумісності між елементами, параметрів навантаження, джерела живлення та способів керування.

Особливу увагу слід приділити вибору типу сервоприводів, які здатні забезпечити необхідний крутний момент, точність позиціонування та

швидкість реакції. Також важливим є підбір живлення відповідної потужності, що зможе одночасно забезпечити стабільну роботу всіх приводів без перевантажень. Не менш суттєвим є розведення з'єднувальних ліній, що забезпечують передачу сигналів керування та живлення між Arduino і виконавчими елементами. Таким чином, навіть за доволі простою принциповою схемою стоїть комплексна інженерна задача, яка передбачає аналіз, моделювання, тестування та практичне впровадження апаратного рішення. Це забезпечує надійну та стабільну роботу маніпулятора в процесі виконання автоматизованому сортуванню ОВ.

Найбільш оптимальним вибором мікроконтролера для реалізації даного проєкту є Arduino UNO. У наступних підрозділах буде детально обґрунтовано, чому саме цей мікроконтролер є найкращим варіантом для керування роботизованим маніпулятором. Його апаратні та програмні можливості ідеально підходять для забезпечення надійної та стабільної роботи системи сортування ОВ, тепер складемо електричну принципову схему Arduino UNO (рис.4.2).

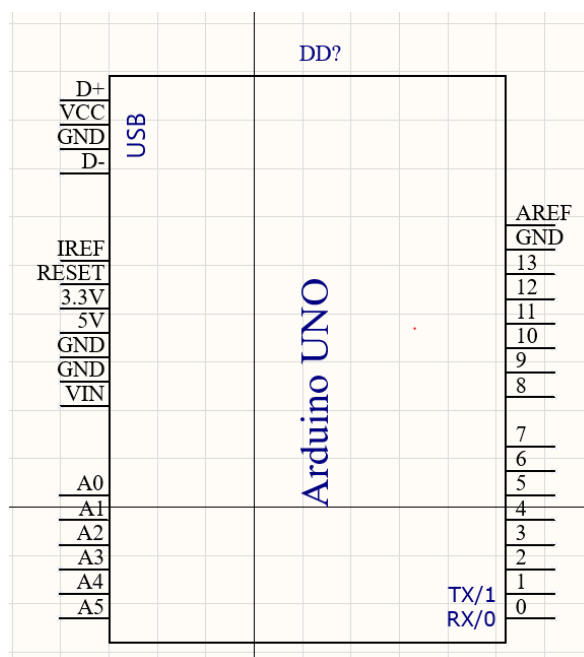


Рис. 4.2. Схематичне зображення корпусу платформи Arduino UNO

Після того як було обрано та накреслено принципову електричну схему мікроконтролера, зробимо те саме для сервоприводів які приймають таку ж важливу роль у даному проєкті, складемо електричну принципову схему для сервопривода, хоч вони і мають різні розміри та потужність, але внутрішня будова у них однакова (рис. 4.3)

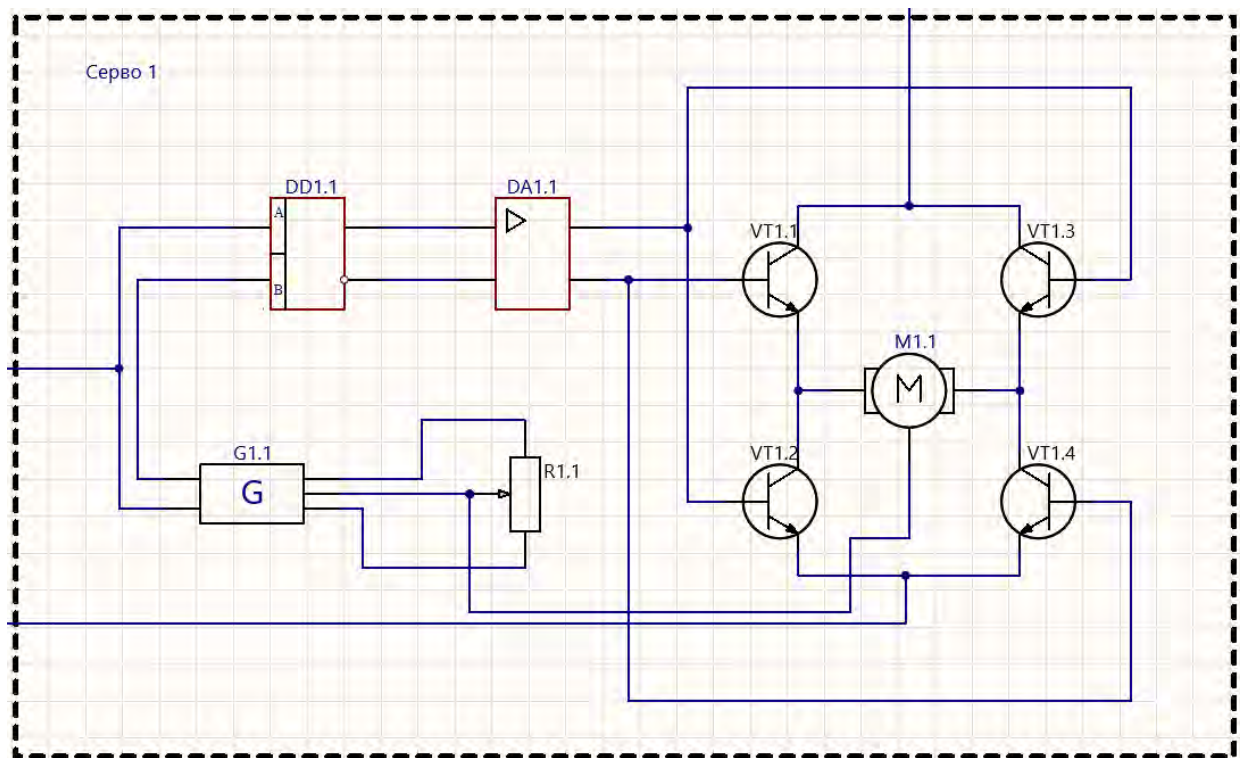


Рис. 4.3. Електрична принципова схема сервопривода

Тепер розберемо більш детально, як працює сервопривід. Отже, імпульсний сигнал надходить від ресивера на компататор (DD1.1) і в той же час активує ГОП (G1.1). Тривалість опорного імпульсу пов'язана з положенням потенціометра, який з'єднаний з вихідним валом фізично. Коли повзунок потенціометра знаходиться в середній позиції, довжина сигналу становить 1,5 мс, якщо ж положення крайнє – 0,8 або 2,2 мс. Керуючий сигнал і опорний імпульс аналізуються компататором, який розраховує їх різницю (розрахунок ведеться за тривалістю імпульсів). Саме довжина різницевого імпульсу і визначає, наскільки «очікуваний» і «фактичний» стан повзунка потенціометра

збігаються. Отриманий показник зберігається в якості потенціалу в UBХ (DA1.1) [13].

4.2. Розрахунок та вибір елементної бази схеми електричної принципової

Після розробки загальної концепції електричної схеми роботизованого маніпулятора, наступним критично важливим етапом є розрахунок і обґрунтований вибір елементної бази, що забезпечить коректну, стабільну та безпечну роботу всієї системи. Незважаючи на відносну простоту структури схеми — мікроконтролер Arduino та шість сервоприводів, — кожен з її компонентів має бути підібраний з урахуванням конкретних експлуатаційних вимог, таких як рівень струмового навантаження, енергоспоживання, сумісність логічних рівнів сигналів, необхідний крутний момент, точність позиціонування та теплові характеристики. У цьому розділі буде розглянуто основні критерії вибору таких ключових елементів, як сервоприводи, мікроконтролер, джерело живлення, провідники та допоміжні електронні компоненти, а також проведено попередній розрахунок навантаження на систему. Це дозволить сформуванню надійну елементну базу, яка стане основою для створення функціонального макету роботизованого маніпулятора.

4.2.1. Розрахунок та вибір мікроконтролера

Вибір мікроконтролера для робота-маніпулятора є ключовим етапом, оскільки саме він керує всіма виконавчими елементами, обробляє сигнали від датчиків і забезпечує взаємодію з користувачем або зовнішніми системами. Щоб обрати відповідний мікроконтролер, варто врахувати такі основні критерії:

- 1) Перше це кількість цифрових пінів для керування усіма сервоприводами, оскільки в даній схемі їх 6.

2) Тип живлення та сумісність з сервоприводами, мікроконтролер має працювати на 5V, як і сервоприводи.

3) Можливість програмувати в онлайн середовищі та сумісність з ним, та підтримка бібліотек для роботи з сервоприводами.

У межах даного проєкту, який передбачає створення макету роботизованого маніпулятора для автоматизованого сортування об'єктів виробництва, мікроконтролер Arduino Uno (рис. 4.4) є найбільш доцільним і оптимальним вибором. Це обумовлено кількома ключовими факторами, які відповідають технічним та функціональним вимогам системи.



Рис. 4.4. Arduino UNO

Arduino Uno має 14 цифрових пінів, з яких 6 підтримують PWM, що повністю задовольняє потребу у підключенні 6 сервоприводів. Це дозволяє реалізувати управління всіма ступенями свободи маніпулятора без необхідності у зовнішніх модулях розширення.

Arduino Uno підтримується середовищем Tinkercad, яке є надзвичайно простим у використанні та має велику кількість бібліотек і прикладів. Це значно спрощує розробку алгоритмів управління сервоприводами, тестування рухів маніпулятора, а також дає змогу легко адаптувати код під майбутні зміни.

Arduino Uno працює на 5V, що відповідає робочій напрузі використаних у даній роботі сервоприводів. Завдяки цьому не потрібно використовувати окремі джерела живлення, а також Arduino Uno є доступним і недорогим контролером, що дозволяє реалізувати макет навіть при обмеженому бюджеті. Це особливо актуально в навчальних і демонстраційних цілях, де не потрібна надмірна продуктивність або промислова надійність.

Основні характеристиками пристрою Arduino Uno:

- Пам'ять Flash - 32Kb.
- Частота - 16 МГц.
- Мікроконтролер - ATmega328.
- Вхідне живлення контролера 5 V-12 V.
- Цифрові входи та виходи - 14 шт., з них 6 шт. - ШІМ.
- Інтерфейси - I2C/TWI, SPI, PWM.
- Розмір: 68 x 53 x 15 мм.

4.2.2. Розрахунок та вибір сервоприводів

Сервоприводи є ключовими виконавчими елементами у конструкції роботизованого маніпулятора, оскільки саме вони забезпечують необхідні переміщення ланок та здійснюють реалізацію точних і керованих рухів у процесі сортування об'єктів виробництва. Від правильності їхнього вибору залежить не лише ефективність роботи всієї системи, а й надійність, стабільність та точність виконання завдань. Для цього потрібно провести процес розрахунку основних експлуатаційних параметрів, які повинні відповідати обрані сервоприводи, зокрема: крутний момент, швидкість обертання, робоча напруга, споживаний струм, конструктивні габарити та інші характеристики, що впливають на динаміку роботи маніпулятора.

Для реалізації рухів маніпулятора потрібно використовувати два типи сервоприводів: звичайний для основних з'єднань та міні версію для малих ланок та захвату. З огляду на кінематичну схему (рис. 3.2) для з'єднань q1, q2,

q3 буде використовуватися сервоприводи звичайних розмірів, а для q4, q5 та захвату версія міні, оскільки навантаження в цих місцях набагато менше.

Одна з найважливіших характеристик сервоприводу — так званий крутний момент.

Крутний момент або момент сили (момент сили відносно точки) — векторна фізична величина, що характеризує дію сили на механічний об'єкт, яка може викликати його обертальний рух. Визначається як векторний добуток радіус-вектора точки прикладання сили [13] (рис. 4.5).

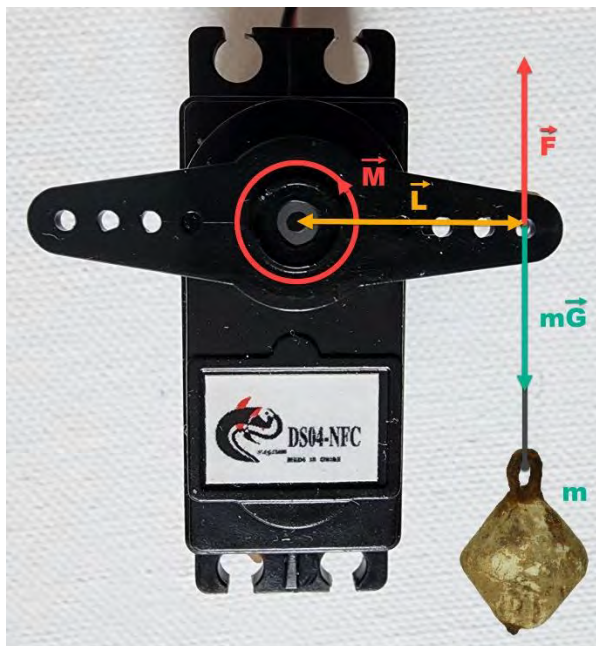


Рис. 4.5. Визначення крутного моменту

Крутний момент, як це показано на (рис.4.2), визначається за формулою:

$$\vec{M} = \vec{F} * \vec{L}, \quad (4.1)$$

де M – крутний момент сервоприводу, L – довжина важеля, F – сила. Якщо , як показано на (рис. 4.5), ми підвісимо вантаж масою m , рівною, наприклад, 2 кг, то він буде впливати на важіль сервоприводу з силою, рівною добутку маси на прискорення вільного падіння $m * G$, рівною 19,6 Н (Ньютон):

$$2\text{кг} * 9,8\text{м}^2 = 19,6 \text{ Н.} \quad (4.2)$$

Наприклад, на вал двигуна встановимо важіль довжиною 1 см. Якщо підвісити на кінець цього важеля такий вантаж, і двигун буде в змозі його утримати, то крутний момент M за своїм абсолютним значенням (модулем) буде дорівнювати 2 кг/см. Тут передбачається, що кут між радіус-вектором точки прикладання сили L і вектором сили F становить 90° [13] (як на рис. 4.2).

Тепер підставимо в формулу значення маси ланок маніпуляра та порахує крутий момент для основних сервоприводів, там міні.

1) Визначемо силу яка діє на основні сервоприводи, але для початку взвісімо елементи маніпулятора та його самого. Уся конструкція яка прикріплена до бази важить 250 г, з урахуванням компоненту бази яка обертає руку маніпулятора. Окремі елементи мають наступну вагу: база – 205 г, Ланка 1 – 70 г, Ланка 2 – 51 г, Ланка 3 – 10 г, захватний механізм – 40 г, розрахунки будуть наступними:

1. з'єднання $q1$: $0,250\text{кг} * 9,8\text{м}^2 = 2,45 \text{ Н};$
2. з'єднання $q2$: $0,070\text{кг} * 9,8\text{м}^2 = 0,686 \text{ Н};$
3. з'єднання $q3$: $0,051\text{кг} * 9,8\text{м}^2 = 0,4998 \text{ Н}.$

Оскільки з'єднання $q1$ має найбільше навантаження доцільно розрахувати крутий момент саме по ньому, щоб не використовувати окремі сервоприводи для кожного з'єднання та облегшити вибір. Довжина валу сервоприводу становить 1 см

1. з'єднання $q1$: $2,45 * 1 = 2,45 \text{ кг/см};$
2. з'єднання $q2$: $0,686 * 1 = 0,686 \text{ кг/см};$
3. з'єднання $q3$: $0,4998 * 1 = 0,4998 \text{ кг/см}.$

Отже, можна зробити висновок, що для ефективної та стабільної роботи маніпулятора в кінематичній парі q_1 , крутний момент сервопривода має становити не менше 2,45 кг/см. Проте, з урахуванням практичних умов експлуатації, зокрема можливих збурень, інерційних навантажень та забезпечення довговічності приводу, доцільно передбачити запас потужності не менше ніж у 1,5 рази. Таким чином, оптимальним буде обрання сервопривода з крутним моментом не менше ніж 4 кг·см, що дозволить уникнути перевантажень і забезпечить надійне функціонування системи при змінних навантаженнях.

2) Визначемо силу яка діє на міні сервоприводи які будуть знаходитися в кінематичних парах q_4 , q_5 та в самому захватному механізмі, щоб затискати та розтискати «пальці» маніпулятора, вага компонентів захватного механізму з урахуванням об'єктів які він має сортувати – 30 г:

1. з'єднання q_4 : $0,010\text{кг} * 9,8\text{м}^2 = 0,098 \text{ Н}$;
2. з'єднання q_5 : $0,040\text{кг} * 9,8\text{м}^2 = 0,392 \text{ Н}$;
3. для захватного механізму: $0,030\text{кг} * 9,8\text{м}^2 = 0,294 \text{ Н}$.

Виберемо найбільше значення та вже по ньому визначимо крутий момент для міні сервоприводу, довжина його валу також 1 см:

1. з'єднання q_4 : $0,098 * 1 = 0,098 \text{ кг/см}$;
2. з'єднання q_5 : $0,392 * 1 = 0,392 \text{ кг/см}$;
3. для захватного механізму: $0,294 * 1 = 0,294 \text{ кг/см}$.

Отже, з огляду на розрахунки можемо зробити висновок, що для стабільної роботи маніпулятора в кінематичних парах q_4 , q_5 та захватному механізмі, мінімальний крутий момент має дорівнювати 0,392 кг/см. Зважаючи на реальні умови експлуатації, такі як можливі збурення, інерційні впливи та необхідність забезпечення стабільної роботи приводу протягом тривалого

часу, доцільно враховувати запас потужності щонайменше в 1,5 рази. Тому краще використовувати сервопривід з крутним моментом не менше ніж 1 кг/см. Це дозволить ефективно запобігати перевантаженням і гарантувати надійну та безперебійну роботу маніпулятора навіть при змінних навантаженнях.

Після визначення необхідного крутного моменту наступним етапом є підбір відповідного сервопривода з урахуванням робочої напруги. Для розроблюваного макету передбачене живлення з джерелом напруги приблизно 5 В, тому вибір виконавчих елементів має базуватись на їхній сумісності з цим параметром. Крім того, суттєве значення мають габаритні розміри та маса сервопривода, адже надлишкова вага або великі розміри можуть негативно вплинути на динаміку та точність рухів маніпулятора.

1) Після аналізу кількох варіантів було обрано сервопривід TowerPro S3003 Futaba (рис. 4.6) для основних ланок, який відповідає вимогам проекту як за технічними параметрами, так і за конструктивною сумісністю, характеристики вибраного сервоприводу наступні:

- швидкість: 0,23 секунд/60 градусів (4.8В). 0,19 сек/60 градусів (6В);
- крутний момент: 3,2 кг/см (4.8В). 4.1kg / см (6В);
- об'єм: 44мм X 20мм X 40мм;
- вага: 37.2g;
- кут обертання: 180 градусів (вліво і управо на 90°).



Рис. 4.6. сервопривід TowerPro S3003 Futaba

Обраний сервопривід TowerPro S3003 Futaba забезпечує оптимальне співвідношення між необхідним крутним моментом, робочими

характеристиками та масо-габаритними параметрами. При живленні напругою до 5V він видає достатній крутний момент із запасом для виконання завдань сортування, має достатню швидкість реагування та невелику масу — всього 37,2 г. Для порівняння, сервопривід MG996, хоча й забезпечує значно більший крутний момент — до 9,4 кг/см при 4,8 В, але має масу близько 55 г, що не є доцільним у даному проєкті. З огляду на те, що роботизований маніпулятор призначений для сортування легких предметів масою до 5 г, надлишкова потужність у даному випадку не використовується, а зайва вага може негативно впливати на точність та енергоефективність системи.

Таким чином, вибір TowerPro S3003 Futaba є технічно обґрунтованим, оскільки дозволяє зменшити загальну масу маніпулятора, зберігаючи при цьому необхідний функціональний запас за потужністю та забезпечуючи стабільну роботу основних виконавчих ланок.

2) Для з'єднань поменше, які будуть приводити в рух зап'ястя та пристрій захвату був обраний міні сервопривід Tower Pro SG90 (Рис. 4.7), який має основні характеристики:

- Швидкість без навантаження: 0.12 сек / 60 град. при живленні 4.8В;
- Крутний момент: 2 кг / см;
- Робоча напруга живлення: 3.5-5 В;
- Кут повороту $\sim 180^\circ$;
- Розміри: 3.3 см x 3 см x 1.3 см;
- Вага: 9 г.



Рис. 4.7. Сервопривід Tower Pro SG90

Сервопривід SG90 є широко розповсюдженим і популярним рішенням для навчальних та демонстраційних проєктів завдяки своїй доступності, компактності та достатніх для легких завдань. Хоча він поступається своїм аналогам, таким як MG90S або A0090, які мають аналогічну масу й габарити, але водночас забезпечують вищий крутний момент, вибір саме SG90 є більш доцільним з економічної точки зору. Ці покращені моделі коштують майже вдвічі дорожче, що не є виправданим у межах цього проєкту, оскільки розроблюваний маніпулятор виконує функцію демонстраційного зразка автоматизованої системи сортування ОВ, а не серійного або промислового пристрою. При цьому SG90 має всі необхідні характеристики для роботи з легкими предметами масою до 5 г, що відповідає завданням проєкту.

Таким чином, з урахуванням поставленої мети, бюджету та навантаження, вибір SG90 є обґрунтованим та оптимальним для реалізації макету роботизованого маніпулятора в кінематичних парах q4, q5 та для роботи захватного механізму

4.2.3. Розрахунок та вибір з'єднувальних провідників

Вибір з'єднувальних провідників для роботизованого маніпулятора — важливий етап, що впливає на надійність, безпечність та стабільну роботу всієї електричної схеми. Провідники забезпечують подачу живлення до сервоприводів і передачу керуючих сигналів від мікроконтролера, тому їх вибір повинен ґрунтуватися на низці технічних критеріїв.

Більшість сервоприводів використовують стандартний 3-контактний штекер з однаковим сигналом управління. Роз'єм є гніздом, 3-контактним, з кроком 2.5мм. Одним із ключових параметрів при виборі з'єднувальних дротів для маніпулятора є перетин провідника, оскільки він безпосередньо визначає здатність проводу передавати струм без надмірного нагріву та втрат напруги. Для більшості стандартних сервоприводів, струм яких не перевищує 1 А, оптимальним є провід із перетином 0.2–0.35 мм². Такий розмір забезпечує

достатню провідність та дозволяє уникнути перегріву навіть у випадку тривалої роботи.

Ще один важливий аспект — гнучкість проводу. Оскільки провідники в конструкції маніпулятора часто зазнають багаторазових згинань, зокрема під гострими кутами, саме тому кабель повинен бути багатожильним та мати еластичну ізоляцію, яка не тріскається й не ламається при механічних навантаженнях. Це особливо важливо в мобільних вузлах або при інтенсивному русі маніпуляторних ланок. Найважливішою характеристикою, що визначає якість проводу, є матеріал струмопровідної жили. Мідь вважається ідеальним матеріалом для таких цілей, оскільки вона має високу електропровідність, довговічність та механічну міцність [14].

Проаналізувавши всі вимоги, вибір пав на з'єднувальні провідники, що найчастіше використовуються разом з Arduino, — це джамперні дроти Dupont (рис 4.8). Вони спеціально призначені для швидкого монтажу схем у прототипуванні, навчальних проєктах та макетуванні без потреби в пайці. Для побудови схеми будуть використовуватися два типи дротів, тобто які на своїх кінцях мають конектори типу: тато-тато та тато-мама.



Рис. 4.8. З'єднувальні провідники джампери Dupont

Технічні характеристики:

- матеріал жили: Мідь або оміднений алюміній;
- перетин дроту: Зазвичай $\sim 0.12\text{--}0.25\text{ мм}^2$ ($\approx 26\text{--}24\text{ AWG}$);
- максимальний струм: $0.5\text{--}1\text{ А}$ (залежно від довжини і якості);

- ізоляція: ПВХ, іноді силікон;
- довжина: Від 10 до 30 см (найпоширені — 20 см);
- роз'єми: Стандартні Dupont-конектори.

З'єднувальні дроти Arduino типу jumper wires — це зручне рішення для побудови макетних схем, зокрема в проєктах з маніпуляторами. Вони ідеально підходять для підключення сервоприводів, датчиків та модулів, особливо на етапі тестування або створення прототипів. У разі створення постійної конструкції для багатотривалої роботи варто переходити до більш надійного дротового монтажу з паянням або клемами.

4.3. Розробка переліку елементів схеми електричної принципової

Для чіткого ідентифікування всіх елементів на схемі використовується специфікація, яку заповнюють упорядковано зверху вниз і в окремому документі формату А4. Кожен елемент схеми має унікальне позиційне позначення, що складається з літери та послідовного номера (табл. 4.1.) [15]. Позиційне позначення елементів на схемі виконується поряд з умовним знаком, за допомогою порядкових номерів.

Таблиця 4.1

Фрагмент специфікації до схеми електричної принципової

Поз.	Найменування	Кіл.
DD1	Мікроконтролер Arduino UNO	1
	<u>Сервоприводи</u>	
Серво 1 – Серво 3	Tower Pro S3003 Futaba	3
Серво 4 – Серво 6	Tower Pro SG90	3

	<u>З'єднувальні провідники</u>	
	джампери Dupont з конектором типу тато – мама	9
	джампери Dupont з конектором типу тато – тато	9

Елементи розташовуються в таблиці 4.1 відповідно ДСТУ 2.702:2013 [15] та послідовності їх розташування на схемі. Елементи одного типу з однаковими електричними параметрами можуть бути записані в один рядок з відповідними позиціями і загальною кількістю [15].

4.4. Висновки до розділу

1. Розроблено схему електричну принципову розроблюваного макету маніпулятора ПР, яка є базовою складовою функціонування автоматизованої системи сортування об'єктів виробництва. У процесі проєктування було здійснено обґрунтований вибір складових компонентів.

2. На основі проведених розрахунків обрано елементну базу схеми електричної принципової, зокрема, мікроконтролера Arduino Uno, сервоприводів та з'єднувальних провідників. Це дало можливість реалізувати рухові функції розроблюваного макету маніпулятора ПР.

3. Розроблено перелік елементів схеми електричної принципової, які оформлено як окремий документ за вимогами ДСТУ 2.702:2013.

5. РОЗРОБКА МАКЕТУ МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СОРТУВАННЯ

5.1. Вибір середовища для розробки макету маніпулятора промислового робота

Для автоматизації конструювання макету маніпулятора ПР та розробки його 3D моделі і креслення застосовано програмний пакет системи автоматизованого проектування (САПР) SolidWorks 2022 компанії Dassault Systemes (Франція). Система автоматизованого проектування (САПР) — автоматизована система, призначена для автоматизації технологічного процесу проектування виробу, кінцевим результатом якого є комплект проектно-конструкторської документації, достатньої для виготовлення та подальшої експлуатації об'єкта проектування [17]. SolidWorks має зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що значно полегшує процес моделювання. У порівнянні, наприклад, із САПІА, яка також має гарний функціонал та наділена зручним інтерфейсом для розробки об'єктів проектування, але SolidWorks є простішою у використанні та більш сучасним середовищем на даний момент та дуже часто використовується великими корпораціями.

5.2. Вибір матеріалу та способу виготовлення макету маніпулятора промислового робота

У ході розробки макету маніпулятора ПР було враховано низку важливих вимог, що безпосередньо впливають на ефективність реалізації конструкції. Основними критеріями стали: простота виготовлення та функціональність, яка забезпечує виконання базових задач сортування об'єктів.

З урахуванням цих вимог, для виготовлення основних деталей маніпулятора було обрано технологію 3D-друку. Такий підхід дозволив не

лише спростити процес створення макету, а й значно пришвидшити його, забезпечивши при цьому достатню точність та міцність компонентів. Гарним прикладом таких 3D-принтерів є ті, що знаходяться безпосередньо в університеті де і було роздруковано всі елементи макету маніпулятора ПР, за допомогою технології друку FDM. FDM або Fused Deposition Modeling — технологія 3D-друку, що формує виріб з розплавленого пластику, видавлюючи його на платформу шар за шаром [16].

Перш ніж надрукувати модель на 3D-принтері, треба створити її комп'ютерну модель у форматі STL. Для цього використовують ПК і додаткове ПЗ (SolidWorks, ZBrush, Autodesk 3ds Max). Готову модель перевіряють на наявність помилок. Якщо модель готова до друку, її завантажують у програму-слайсер. Софт задає траєкторію-алгоритм нанесення шарів, а також швидкість і температуру друку. Якщо модель має нависні елементи, то автоматично будуть додані підтримувальні елементи. У результаті формується програмний код керування рухомими елементами принтера [15].

Використання технології 3D-друку є надзвичайно вигідним рішенням для виготовлення макету маніпулятора ПР, оскільки цей підхід ідеально підходить для створення індивідуальних, унікальних конструкцій, які не передбачають масового виробництва. У випадку даного проєкту, де маніпулятор розробляється як прототип або навчальний зразок, 3D-друк дозволяє швидко, економно та з високою точністю реалізувати всі необхідні елементи конструкції. Водночас слід зазначити, що така технологія не є оптимальною для серійного виготовлення промислових роботів, де висуваються жорсткі вимоги до механічної міцності, зносостійкості матеріалів та швидкості виробництва. Таким чином, 3D-друк ідеально задовольняє потреби в умовах проєктування та демонстрації концепції, однак має обмеження при впровадженні у великомасштабне виробництво.

Під час вибору матеріалу для виготовлення макету маніпулятора ПР основну увагу було зосереджено на таких параметрах, як міцність,

максимальна робоча температура, щільність, жорсткість, розтягнення, а також, що не менш важливо — доступність матеріалу для широкого користувача. Ці характеристики матеріалу є ключовими при розробці макету маніпулятора ПР, який має витримувати навантаження під час демонстрації, забезпечувати достатню стабільність геометрії конструкції та бути простим у повторному виготовленні за потреби. Для того щоб чітко обрати матеріал потрібно порівняти між собою найрозповсюдженіші пластики для 3D-друку, складемо табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Характеристики пластику для 3D-друку [17]

Пластик	Механічна Міцність(МПа)	Максимальна робоча температура(°C)	Щільність	Жорсткість по Шору	Розтягнення
ABS	40МПа	98(°C)	1,04 г/см ²	D70	8%
PLA	65МПа	52(°C)	1,2 г/см ²	D70	8%
HIPS	32МПа	100(°C)	1,24 г/см ²	D75	30%
PETG	53МПа	73(°C)	1,23 г/см ²	D70	25%
Nylon	40МПа	85(°C)	1,1 г/см ²	D70	8%
ASA	40МПа	95(°C)	1,07 г/см ²	D60	10,5%

Отже, провівши детальний аналіз характеристик найбільш поширених матеріалів для 3D-друку, для виготовлення макету маніпулятора ПР було обрано саме PLA. Кожен компонент макет маніпулятора ПР було надруковано з використанням матеріалу PLA. Візуально макет виконаний у двох кольорах — білому та жовтому, що покращує його зовнішній вигляд і полегшує візуальне розрізнення функціональних частин конструкції.

Такий вибір обґрунтовано низкою важливих переваг цього матеріалу. Зокрема, PLA (полілактид) є одним із найпопулярніших та найдоступніших матеріалів, що активно використовується в навчальних проєктах. Він не потребує високих температур друку, не схильний до усадки під час охолодження, має достатню жорсткість і, найголовніше, — легко обробляється та не створює складнощів під час друку. Це робить PLA ідеальним вибором

для створення демонстраційної моделі, де важливі швидкість виготовлення та стабільна якість друку без необхідності спеціального обладнання. Таким чином, PLA повністю відповідає технічним та практичним вимогам даного проєкту.

Попри популярність та зручність у використанні, матеріал PLA має й певні недоліки, які варто враховувати при розробці макету маніпулятора ПР. Його механічна міцність знаходиться в межах 55–75 МПа, однак за ударостійкістю PLA поступається, в порівнянні з ABS. Це робить його менш придатним для елементів, які піддаються постійним або значним механічним навантаженням. Ще одним суттєвим недоліком є термостійкість — PLA починає деформуватись при температурах понад 52 °C, що є найменшим показником серед представлених в таблиці 5.1. Це повністю виключає використання PLA в умовах підвищеної температури. Крім того, PLA має вищу крихкість у порівнянні з іншими термопластиками, що створює ризик тріщин чи поломок у деталях, які виконують силові або захватні функції. Таким чином, хоч PLA і підходить для розробки макету в учбових та демонстраційних цілях, але застосування PLA в місцях з високим експлуатаційним навантаженням та високої температури потребує обережного підходу.

5.3. Опис конструкції макету маніпулятора промислового робота

Конструкція маніпулятора ПР була розроблена з урахуванням попередньо сформованих структурної, кінематичної та електричної принципової схем. Основною метою є забезпечення працездатності макету маніпулятора ПР щоб він міг продемонструвати можливості автоматизованого сортування ОВ.

Під час розробки конструкції враховувалися такі ключові аспекти: достатня жорсткість ланок, компактність та простота монтажу, а також можливість інтеграції електронних компонентів, зокрема сервоприводів в

ланки маніпулятора. Структура маніпулятора дозволяє йому вільно виконувати необхідні переміщення в межах заданого робочого простору, що є критично важливим для точного й ефективного сортування предметів різної форми та розміру.

Загалом, як описувалося в розділі про кінематичну схему, макет маніпулятора ПР умовно ділиться на: базу, ланку 1, ланку 2, ланку 3 та захватний пристрій. Проте складається з більшої кількості елементів, а саме:

База є фундаментальною частиною конструкції макету маніпулятора ПР та виконує роль опорної платформи, на якій закріплюється вся система. Вона складається з двох основних елементів, які утворюють між собою кінематичну пару q_1 . Перша частина бази виконує функцію стаціонарного корпусу, що забезпечує надійне фіксування конструкції до платформи або робочої поверхні, гарантуючи стабільність і точність усіх подальших рухів. Ця частина конструкції є важливою не лише для механічної жорсткості, а й для точного позиціонування інших елементів маніпулятора. Візуальне зображення корпусу макету маніпулятора ПР наведено на рис. 5.1.

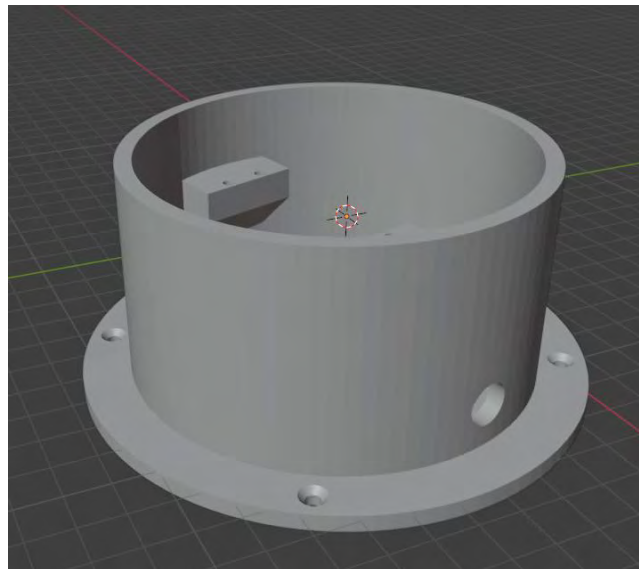


Рис. 5.1. Корпус макету маніпулятора ПР

У центральній частині корпусу розміщується перший основний сервопривід, який відповідає за обертання майже всієї конструкції в площині

XOZ, формуючи тим самим кінематичну пару q_1 . До верхньої частини бази закріплюється наступний конструктивний елемент, який виконує функцію проміжної поворотної ланки й умовно може називатися "талією" маніпулятора ПР. Саме через цей вузол передається обертальний рух до наступних з'єднань конструкції. Його структура показано на рис. 5.2.

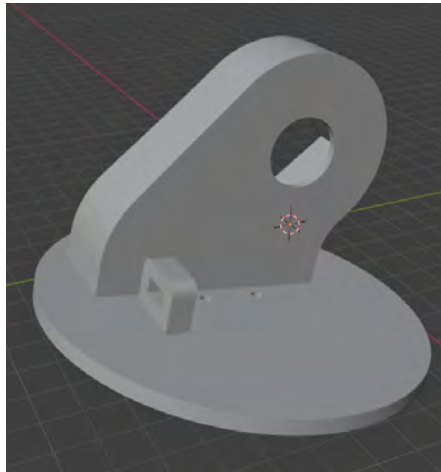


Рис. 5.2. Талія макету маніпулятора ПР

Саме талія маніпулятора є тією частиною конструкції, яка безпосередньо приводиться в рух сервоприводом, розташованим у середині корпусу. У верхній частині талії передбачено спеціальне заглиблення, в якому встановлюється другий ключовий сервопривід. Його функція — обертати першу робочу ланку маніпулятора по осі ХУ, формуючи тим самим між талією і першою ланкою кінематичну пару q_2 . Конструкція першої ланки, що безпосередньо з'єднується з талією, представлена на рис. 5.3.



Рис. 5.3. Перша ланка макету маніпулятора ПР

Перша ланка конструкції виконує функцію "плеча" маніпулятора, забезпечуючи вертикальний рух у площині XY. У її конструкції передбачено невеликий гачок, розташований у нижній частині. Цей елемент не є декоративним — він слугує функціональною опорою на яку кріпиться резинка, яка натягується між першою ланкою та талією. Призначення цієї резинки полягає у частковому розвантаженні другого сервопривода, який відповідає за обертання першої ланки. Оскільки цей привід несе на собі вагу решти "руки" маніпулятора, при досягненні екстремальних кутів нахилу виникає потреба в допоміжній силі, щоб уникнути перенавантаження. Еластичне з'єднання таким чином стабілізує рух і зменшує навантаження на сервопривід у критичних положеннях.

До іншого кінця першої ланки кріпиться друга ланка, яка продовжує траєкторію руху маніпулятора. Ці дві ланки разом утворюють кінематичну пару q_3 , яка забезпечує наступну ступінь свободи. Друга ланка детально показана на рис. 5.4.

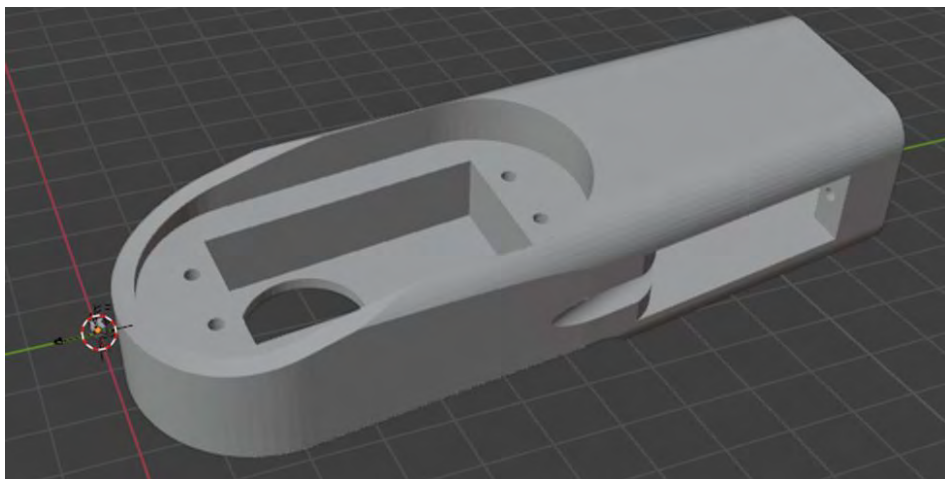


Рис. 5.4. Друга ланка макету маніпулятора ПР

Друга ланка виконує роль передпліччя маніпулятора і є продовженням основної рухомої частини. Вона з'єднується з першою ланкою за допомогою третього сервоприводу, та з третьою ланкою, за допомогою четвертого міні сервоприводу який встановлений у спеціальному заглибленні корпусу. Цей

сервопривід забезпечує обертання третьої ланки по осі ХУ, формуючи кінематичну пару q_4 . Третя ланка зображена на рис. 5.5.

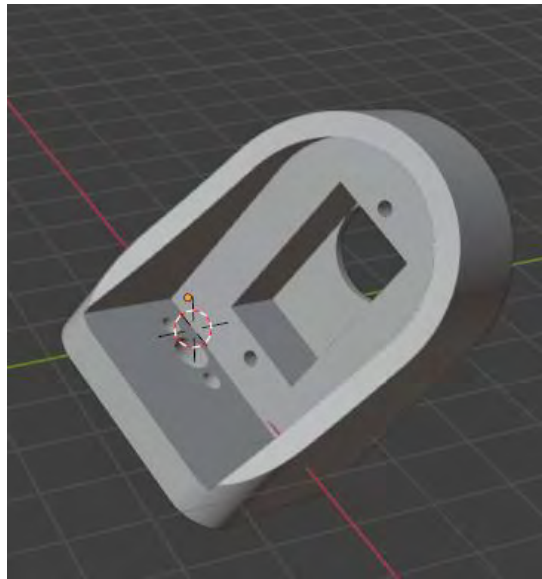


Рис. 5.5. Третя ланка макету маніпулятора ПР

Третя ланка маніпулятора виконує функцію "кисті", тобто кінцевої рухомої ланки, яка забезпечує точне позиціонування захватного пристрою. Її рух відбувається відносно площини YZ, що дозволяє орієнтувати захватний пристрій у вертикальній площині та розширює функціональні можливості маніпулятора. У корпусі третьої ланки передбачено вбудоване заглиблення, в якому розміщується другий міні сервопривід. Цей сервопривід відповідає за керування захватним пристроєм, а саме за переміщення по осі ХУ. Взаємодія третьої ланки із захватним механізмом формує останню кінематичну пару q_5 , яка завершує структуру п'ятиступеневого маніпулятора.

Зовнішній вигляд та конструкція захватного пристрою наведені на рис. 5.6. Цей елемент виконує ключову функцію взаємодії маніпулятора з об'єктами сортування, тому його конструкція має відповідати вимогам точності, надійності та легкості у використанні.

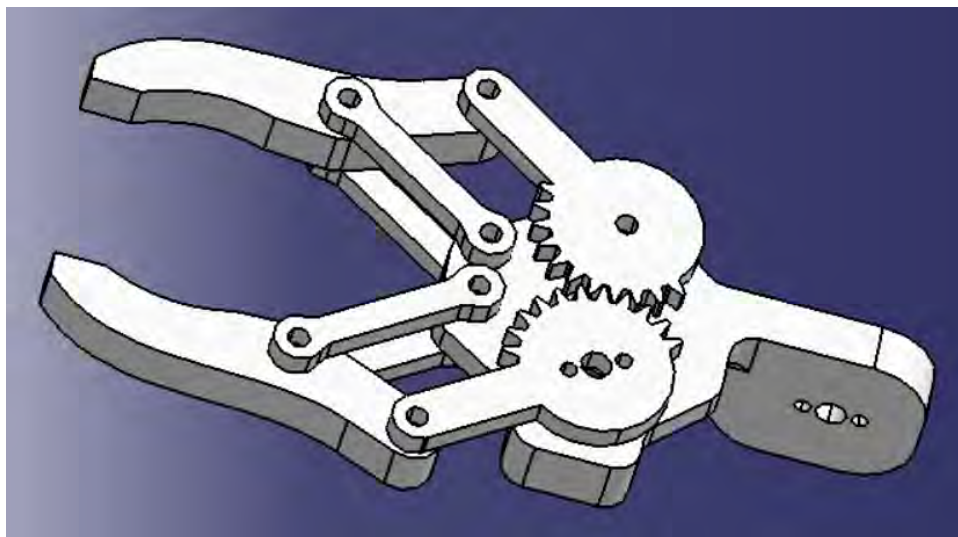


Рис. 5.6. Захватний механізм макету маніпулятора ПР

Захватний механізм виконує ключову функцію взаємодії з об'єктами сортування та умовно імітує рух пальців руки. Цей рух забезпечується останнім міні сервоприводом, розміщеним прямо в захватному механізмі, який активує механізм відкривання та закривання «пальців» захватного механізму. На рис 5.6 представлено загальний вигляд зібраної конструкції захватного механізму, однак для повного розуміння принципу його роботи доцільно детально розглянути кожен з його компонентів та проаналізувати їх функціональне призначення.

Першим ключовим елементом є база захватного пристрою, яка безпосередньо з'єднується з третьою ланкою маніпулятора. Саме ця деталь забезпечує закріплення всієї конструкції захватного механізму з третьою ланкою та дає змогу виконувати рух в площині ХУ, що необхідно для точного позиціонування механізму під час виконання захоплення. Геометричні особливості та форма бази захватного пристрою зображені на рис. 5.7. Вона служить платформою для подальшого поєднання з іншими компонентами захватного механізму.

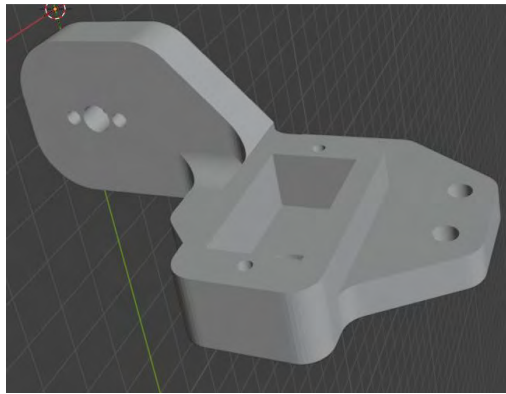


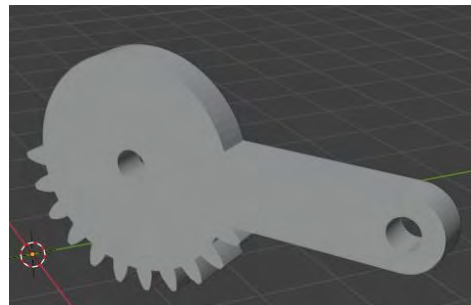
Рис. 5.7. База захватного пристрою

До бази захватного пристрою закріплюються інші ключові компоненти його механізму — дві шестерні, які забезпечують передачу обертального моменту від сервопривода до рухомих частин захвата. Одна з шестерень є головною — вона жорстко з'єднана з валом міні сервопривода, що дозволяє безпосередньо керувати «пальцями» захватного механізму. Друга шестерня — допоміжна, взаємодіє з головною через зубчасту передачу, синхронізуючи рух обох сторін захвата. Завдяки такій конструкції, обертання сервопривода перетворюється на одночасне зведення або розведення захватних «пальців», що дозволяє ефективно здійснювати сортування об'єктів. Зображення шестерень наведено на рис. 5.8, де:

- а — головна шестерня (з'єднана з сервоприводом);
- б — допоміжна шестерня (передає обертання другій частині захвата).



а



б

Рис. 5.6. Шестерні захватного пристрою

а – головна шестерня, б – допоміжні шестерня

До отвору, розташованого в центрі головної та допоміжної шестерні, прикріплюються чотири поперечні перегородки, по два на кожну шестерню, які виконують функцію стабілізації руху захватного механізму. Ці перегородки з'єднують обертову частину шестерні з «пальцями» конструкції захватного механізму, забезпечуючи рівномірний розподіл навантаження та запобігаючи перекосам під час роботи захватного механізму

Конструкція таких елементів підвищує механічну стійкість і точність руху, що особливо важливо при роботі з легкими та дрібними об'єктами. Візуалізація перегородок представлена на рис. 5.7.



Рис. 5.7. Перегородка захватного пристрою

До протилежних отворів шестерень і перегородок кріпляться рухомі елементи, які умовно можна назвати «пальцями» захватного механізму, оскільки саме вони безпосередньо здійснюють контакт із об'єктами сортування та виконують дію захвату. У конструкції передбачено два однакових пальці, розташованих симетрично по обидва боки бази захватного механізму. Їхня синхронна робота забезпечується передачею обертового моменту через шестерні, що дозволяє надійно фіксувати предмети різної форми та розміру в робочій зоні маніпулятора.

Така конструкція забезпечує простоту механіки та ефективність захоплення, що є важливим для стабільного функціонування автоматизованої системи. Зображення «пальців» представлено на рис. 5.8.

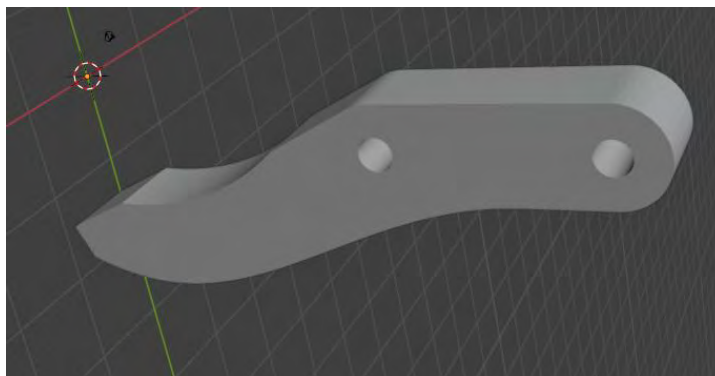


Рис. 5.8. Пальці захватного пристрою

Після детального опису кожного конструктивного елемента макету маніпулятора ПР, наступним логічним кроком є визначення його загальних габаритів. З огляду на те, що даний маніпулятор виконує функцію демонстраційного макету, призначеного для наочного показу принципів автоматизованого сортування, важливо забезпечити компактність його конструкції. Макет маніпулятора ПР має бути достатньо малогабаритним, щоб його можна було зручно транспортувати та встановлювати в різноманітних умовах та демонструвати в обмеженому просторі, зокрема в лабораторіях, навчальних аудиторіях чи на виставках.

З урахуванням вищезазначених вимог до компактності та мобільності, було ретельно визначено габаритні розміри кожного конструктивного елемента маніпулятора ПР. Усі розміри й маса компонентів, а також загальна маса зібраного макету, систематизовано для наочності у табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Габарити та маса елементів макету маніпулятора ПР

Елемент	Довжина (мм)	Вага (г)
База	60мм	205г
Ланка 1	120мм	70г
Ланка 2	96мм	51г
Ланка 3	30мм	10г
Захватний механізм	80-125мм	40г

Максимальна висота макету маніпулятора ПР у розгорнутому стані може досягати 431 мм. Проте, у робочому положенні, тобто під час виконання основних функцій сортування, реальна висота маніпулятора зазвичай складає близько 300–350 мм. Такий розмір забезпечує компактність та зручність у розміщенні на робочій поверхні та дає достатній діапазон руху для виконання демонстраційних задач.

Загальна вага макету маніпулятора ПР без урахування електроніки та з'єднувальних провідників становить приблизно 376 г. Однак з урахуванням повної комплектації конструкції, яка передбачає встановлення трьох основних сервоприводів і трьох міні сервоприводів (загальною масою близько 140 г), а також з'єднувальних провідників та монтажних елементів, загальна вага всього макету може досягати близько 525 г.

На основі детального аналізу всіх ключових аспектів конструкції — включаючи компонентний склад макету, його габаритні розміри та масу, обраний матеріал PLA, обрані сервоприводи та з'єднувальні провідники а також структурну, кінематичну та електричну принципову схеми, було успішно реалізовано фізичний макет маніпулятора ПР (рис.5.9).

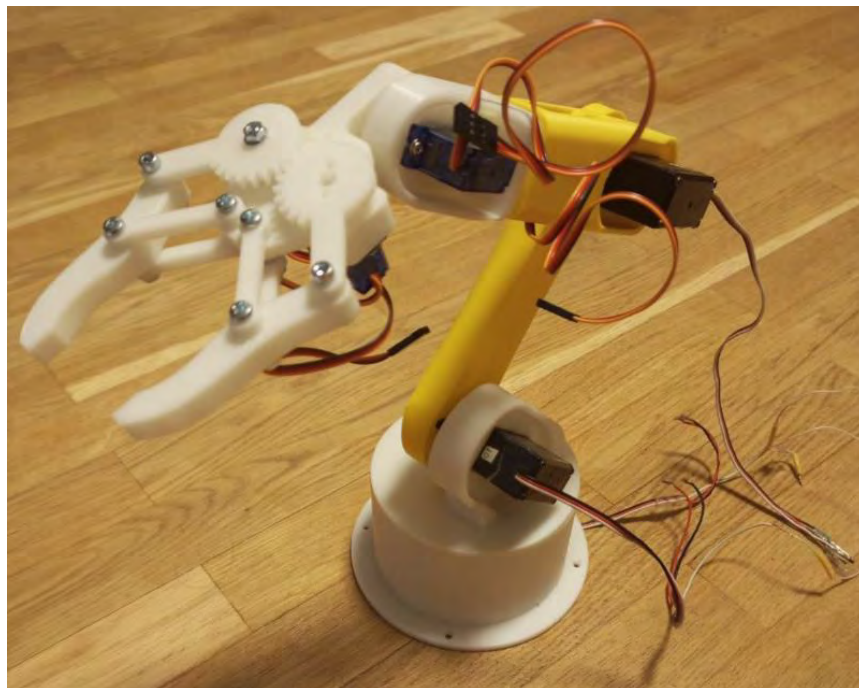


Рис. 5.9. Готовий натурний маніпулятора ПР

Даний макет повністю відповідає попередньо визначеним технічним вимогам і призначений для наочної демонстрації функціональних можливостей автоматизованого сортування ОВ. Реалізація конструкції в реальних умовах дозволила перевірити ефективність роботи всіх підсистем, зокрема механічної частини, електроніки та алгоритмів керування

5.4. Висновки до розділу

1) Було обрано середовище для розробки макету маніпулятора ПР, ним стало САПР SolidWorks 2022, оскільки серед серед усіх сучасних САПР-платформ SolidWorks вирізняється сучасним інтерфейсом, зручністю у користуванні та широкими можливостями для 3D-моделювання, конструювання та симуляції механічних систем.

2) Було проведено детальний аналіз серед найбільш популярних матеріалів, що використовуються для 3D-друку, з урахуванням таких параметрів, як міцність, термостійкість, простота друку, щільність та доступність. У результаті було обрано матеріал PLA, який, незважаючи на певні недоліки — зокрема невисоку термостійкість і крихкість — виявився найкращим варіантом саме для виготовлення демонстраційного макету маніпулятора ПР. Оскільки має низку ключових переваг, зокрема легкість у друці, відсутність усадки, гарний зовнішній вигляд і сумісність із більшістю 3D-принтерів, тому PLA є оптимальним вибором для реалізації макету маніпулятора ПР, який не передбачає значні механічні навантаження чи високотемпературні умови експлуатації.

3) Було здійснено загальний опис конструкції макету маніпулятора ПР. Детально розглянуто кожен структурний елемент, його функціональне призначення та взаємозв'язок у загальній кінематичній схемі пристрою. Також було приділено увагу вибору габаритних розмірів та маси окремих частин конструкції, що є дуже важливим для забезпечення стабільності, точності та демонстраційної ефективності маніпулятора. Крім того, представлено фізично

реалізований макет маніпулятора, який наочно підтверджує відповідність між теоретичними розрахунками та практичним втіленням конструкції. Це дозволяє оцінити реальні можливості моделі, візуалізувати її кінематичні рухи та протестувати функціональність автоматизованого сортування ОВ.

ВИСНОВКИ

1. У даному дипломному проєкті було розроблено функціональний макет маніпулятора промислового робота, призначений для демонстрації принципів роботизованого сортування об'єктів виробництва. Конструкція реалізована з урахуванням основних вимог до компактності та функціональності.

2. Проведено детальний аналіз сучасного стану проблеми роботизованого сортування об'єктів виробництва у машино- та приладобудуванні, що дозволив окреслити основні перспективи впровадження автоматизованих систем сортування. У ході дослідження було з'ясовано, що інтенсивний розвиток технологій автоматизації, зокрема промислової робототехніки, сприяє поступовому витісненню ручних методів сортування.

3. Розроблено структурну схему системи роботизованого сортування, яка демонструє взаємозв'язки між основними функціональними компонентами. Зокрема, було відображено взаємодію між підсистемою керування та об'єктом керування, що є ключовими елементами для забезпечення узгодженої, ефективної та стабільної роботи всієї системи сортування в умовах автоматизованого виробничого процесу.

4. Розроблено кінематичну схему маніпулятора промислового робота, яка стала основою для визначення конструктивної побудови всієї системи. Схема відображає кількість ланок та кінематичних пар і їх розміщення на схемі. Це дало змогу забезпечити необхідну інформацію про будову конструкції та кількість ступенів свободи для реалізації макету маніпулятора ПР.

5. Розроблено електричну принципову схему маніпулятора промислового робота, призначеного для реалізації процесу автоматизованого сортування об'єктів виробництва. Схема включає в себе всі основні електронні компоненти, зокрема мікроконтролер, сервоприводи та джерело живлення із

з'єднувальними провідниками, забезпечуючи надійне керування всіма кінетичними парами маніпулятора. Реалізація схеми електричної принципової дозволила узгодити роботу апаратної частини з програмним забезпеченням та перевірити працездатність системи в реальних умовах.

НАПРЯМКИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Економічне обґрунтування доцільності виконаних розробок.
2. Визначення показників надійності розробленого макету маніпулятора промислового робота.
3. Оснащення розробленого макету маніпулятора промислового робота системою комп'ютерного зору для автоматизації розпізнавання об'єктів виробництва, що підлягають автоматичному сортуванню.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Планування, моделювання та верифікація процесів в гнучких виробничих системах: практикум. Навчально-методичний посібник до виконання практичних, лабораторних і самостійних занять студентів спеціальності 7.05020201, 8.05020201 "Автоматизоване управління технологічними процесами" всіх форм навчання / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, А. Ю. Сазонов, Б. Б. Самотокін / [під. заг. ред. В. А. Кириловича] – Житомир, ЖДТУ 2015. – 274 с.
2. NewDesign. NewFeatures. New Technologies. IRB 4600. ABB Engineered to Outrun [Електронний ресурс]. – Режим доступу
<https://new.abb.com/products/robotics/robots/articulated-robots/irb-4600>
3. NilsBoysen, StefanSchwerdfeger, Marlin W. Ulmer, Robotizedsortingsystems: Large-scaleschedulingunderreal-timeconditionswithlimitedlookahead, *EuropeanJournalofOperationalResearch*, Vol. 310, Is. 2, 2023, P. 582-596, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.037> .
4. XianhaoXu, YuerongChen, BipanZou, YemingGong, Assignment of parcelsto loading stationsin robotic sorting systems, *Transportation Research Part E: Logisticsand Transportation Review*, Vol 164,2022, P. 102808,ISSN 1366-5545, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554522001971>
5. Огляд автоматизації процесу сортування сміття оптико-механічним методом / Д. В. Клименко, С. О. Нечай // Погляд у майбутнє приладобудування : збірник праць XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 18-19 травня 2021р. – К. : ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 196-198.
6. Automated Efficiency: How Sorting Robots Are Streamlining Express Delivery [Електронний ресурс]. – Режим доступу
<https://manlybattery.com/efficient-sorting-robots-in-express-delivery/>
7. Розвиток робототехніки у виробництві в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу

<https://sbrobotics.ua/stati/rozhivok-robototekhniki-u-virobnicztvi-v-ukrayini/>

8. Черепанська І. Ю. Автоматизація процесів керування вибором пристроїв орієнтування при проектуванні гнучких інтегрованих систем: дис. канд. техн. наук: 05.13.07 “Автоматизація процесів керування” / Ірина Юріївна Черепанська. – Київ, 2008. – 380 с.
9. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: У 2 кн. Кн. 2. Керування хіміко-технологічними процесами: навч. посіб. Для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом: «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 336 с.
10. Розробка кінематичної схеми маніпулятора будівельного 3D принтера / О.В. Чигрін, Стельмах Н.В. // XIV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 18-19 травня 2021 – К. : ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2021. – 178 с.
11. Компонування промислових роботів. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/ABП%20В%20ПБ%20PDF%201/other/laboratorna_robota_№4_komponuvannya_promislovix_robotiv.pdf
12. Схема електрична принципова. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%A1%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%B0
13. How to Determine What Torque You Need for Your Servo Motors. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://automaticaddison.com/how-to-determine-what-torque-you-need-for-your-servo-motors/>
14. Selecting the Proper Cables for Your Stepper or Servo System. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.kollmorgen.com/sites/default/files/kol3653_Whitepaper_SelectingCables_F.pdf

15. ДСТУ 2.702:2013. Єдина система конструкторської документації. Правила виконання електричних схем. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=60892
16. Filament Properties Table. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/>
17. САПР [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://wiki.tntu.edu.ua/САПР>

ДОДАТКИ

Надаються за запитом