

**Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу**

Інститут інженерної механіки та робототехніки
Кафедра комп'ютеризованого машинобудування

Мацьків Мирослав Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК _____
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Тема: «Проектування маніпулятора з механічним захватом для автоматизованої
подачі заготовок»

(назва роботи)

Прикладна механіка

(назва освітньої програми)

131- Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

Мацьків М. І.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Костюк Н. О. доц. каф. КМВ

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

професор В.Г. Панчук

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних розробок. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

м.Івано-Франківськ-2025 рік

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної бакалаврської роботи: «Проектування маніпулятора з механічним захватом для автоматизованої подачі заготовок»

Розрахунково-пояснювальна записка: 50 сторінок, 15 рисунків, 8 таблиць, 14 посилань, 51 аркушів ф. А4 1 додатків.

Графічна частина: 5 аркуші формату А1.

Об'єкт дослідження – маніпулятор з механічним захватом, призначений для переміщення заготовок у виробничих умовах.

Предмет дослідження - конструкція маніпулятора та його окремих вузлів, зокрема механічного захвату, кінематичної схеми та несучих елементів.

Мета роботи – розробити конструкцію маніпулятора з механічним захватом для автоматизованої подачі заготовок, що забезпечує точність, жорсткість, надійність та простоту виготовлення в умовах серійного виробництва.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена проектуванню робототехнічного маніпулятора з механічним захватом, який призначений для автоматизованої подачі заготовок у виробничих умовах. У роботі досліджено питання вибору оптимальної кінематичної структури, конструктивного виконання вузлів і системи керування.

У теоретичному розділі проведено аналіз типів робототехнічних маніпуляторів, їх класифікації, конструктивно-функціональних особливостей, а також сучасних методів моделювання і керування. Встановлено ключові технічні, функціональні та експлуатаційні вимоги до маніпулятора.

На основі сформованої структурно-кінематичної схеми виконано розрахунок прямої та оберненої кінематики в середовищі Mathcad, що дозволило визначити необхідні параметри приводів. Обґрунтовано вибір серводвигунів з урахуванням динамічних навантажень і вантажопідйомності.

Конструктивне проектування включає 3D-моделювання всіх основних елементів маніпулятора, зокрема захвата, виконавчих ланок і базового модуля. Розраховано допустимі діапазони кутових переміщень, побудовано робочу зону та визначено граничну вантажопідйомність. Реалізовано систему керування на базі Arduino Uno з передачею команд через СОМ-порт і програмною інтерпретацією заданих положень виконавчих органів.

Результатом роботи є повноцінний інженерний проєкт маніпулятора з механічним захватом, що відповідає сучасним вимогам автоматизації виробничих процесів і може бути впроваджений у практичні системи подачі заготовок.

Ключові слова: *маніпулятор, механічний захват, автоматизація, робототехнічна система, серводвигун, кінематика, вантажопідйомність, система керування, Mathcad, Arduino.*

Студент: Мацьків М. І.

SUMMARY

of the Bachelor's Qualification Work: "Design of a Manipulator with a Mechanical Gripper for Automated Workpiece Feeding"

Explanatory Note: 50 pages, 15 figures,

8 tables, 14 references, 51 A4 sheets, 1 appendix.

Graphic Part: 5 sheets of A1 format.

Object of research – a robotic manipulator with a mechanical gripper intended for workpiece transportation in production conditions. Subject of research – the structure of the manipulator and its individual components, in particular the mechanical gripper, kinematic scheme, and supporting elements.

The aim of the work is to develop a manipulator design with a mechanical gripper for automated workpiece feeding that ensures accuracy, rigidity, reliability, and ease of manufacturing under serial production conditions.

This bachelor's qualification work is dedicated to the design of a robotic manipulator with a mechanical gripper intended for automated workpiece feeding in an industrial environment. The work explores the selection of an optimal kinematic structure, design of key components, and the control system.

The theoretical section analyzes types of robotic manipulators, their classification, structural-functional features, as well as modern methods of modeling and control. Key technical, functional, and operational requirements for the manipulator are defined.

Based on the developed structural-kinematic scheme, direct and inverse kinematics calculations were performed in the Mathcad environment, allowing for the determination of necessary drive parameters. The selection of servo motors was justified considering dynamic loads and load capacity.

The design stage includes 3D modeling of all key components of the manipulator, including the gripper, actuating links, and base module. Permissible angular displacement ranges were calculated, the working area was constructed, and the maximum load capacity was defined. A control system was implemented using Arduino Uno, with command transmission via COM-port and program interpretation of the desired end-effector positions.

The result of the work is a complete engineering project of a manipulator with a mechanical gripper that meets modern requirements for automation of manufacturing processes and can be integrated into practical systems for automated workpiece feeding.

Keywords: *manipulator, mechanical gripper, automation, robotic system, servo motor, kinematics, load capacity, control system, Mathcad, Arduino.*

Student: *Matskiv M. I.*

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інженерної механіки та робототехніки

Кафедра комп'ютеризованого машинобудування

Освітній рівень - бакалавр

Спеціальність 131-Прикладна механіка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

« » 20 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Мацьків Мирослав Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Проектування маніпулятора з механічним захватом для автоматизованої подачі заготовок»

керівник роботи Костюк Н. О. доц. каф. КМВ

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “06” червня 2025 року №332/7

2. Строк подання студентом роботи до 15.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Тема: «Проектування маніпулятора з механічним захватом для автоматизованої подачі заготовок»

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

1. Теоретичні основи моделювання та керування робототехнічними маніпуляторами

2. Обґрунтування вимог, структурно-кінематичний синтез та вибір приводів маніпулятора

3. Проектування конструкції маніпулятора

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

1. Загальний (тема, мета, об'єкт та предмет дослідження, актуальність)

2. Схема маніпулятора

3. Аналіз кінематики маніпулятора

4. 3D - модель маніпулятора

5. Система керування

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Костюк Н. О. доц. каф. КМВ		
2	Костюк Н. О. доц. каф. КМВ		
3	Костюк Н. О. доц. каф. КМВ		

7. Дата видачі завдання 25.02.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичні основи моделювання та керування робототехнічними маніпуляторами	10.03.2025	
2	Обґрунтування вимог, структурно-кінематичний синтез та вибір приводів маніпулятора	15.04.2025	
3	Проектування конструкції маніпулятора	15.05.2025	
4	Пояснювальна записка	2.06.2025	
5	Графічна частина	9.06.2025	

Студент

_____ (підпис)

Мацьків М. І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Костюк Н. О.

(прізвище та ініціали)

Зміст

Вступ		7
1. Теоретичні основи моделювання та керування робототехнічними маніпуляторами		10
1.1. Аналіз типів маніпуляторів і вибір оптимальної схеми.....		10
1.2. Класифікація та конструктивно-функціональні ознаки робототехнічних маніпуляторів.....		14
1.3. Аналіз систем керування маніпулятором.....		17
1.4. Сучасні підходи до моделювання маніпуляторів.....		20
2. Обґрунтування вимог, структурно-кінематичний синтез та вибір приводів маніпулятора		24
2.1. Вимоги до маніпулятора.....		24
2.2. Формування структурно-кінематичної схеми маніпулятора.....		25
2.3. Аналіз прямої та оберненої кінематики маніпулятора з реалізацією розрахунків у середовищі Mathcad.....		28
2.4. Обґрунтування вибору серводвигунів для приводу маніпулятора.....		31
3. Проектування конструкції маніпулятора		33
3.1. Проектування деталей маніпулятора.....		33
3.2. Оцінка допустимих кутових переміщень виконавчих ланок.....		41
3.3. Аналіз робочої зони, і вантажопідйомності маніпулятора		42
3.4. Проектування системи керування маніпулятором.....		44
Висновки.....		48
Список використаної література		50
Додатки.....		51

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ			
<i>Змн</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Мацьків М. І.</i>			Пояснювальна записка БР на тему: «Проектування маніпулятора механічним захватом для автоматизованої подачі заготовок»	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Костюк Н. О.</i>				6	51	
<i>Реценз.</i>						ІФНТУНГ, гр. ПМІ-21-1		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Костюк Н. О.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Панчук В. Г.</i>						

Вступ

Інтенсивний розвиток технологій, підвищення рівня автоматизації та впровадження концепцій "розумного виробництва" (Industry 4.0) істотно змінюють підходи до організації сучасних виробничих процесів. На перший план виходить не лише ефективність основних операцій, але й надійність, швидкодія та точність допоміжних дій, серед яких особливе місце посідає подача, транспортування та орієнтація заготовок.

У багатьох випадках саме процес подачі заготовок є критичною ланкою, що впливає на ритмічність та безперервність роботи всього технологічного комплексу. Використання ручної праці на цьому етапі не лише знижує продуктивність, але й створює небажані перешкоди в умовах серійного або масового виробництва. Тому усе ширше впроваджуються технічні рішення, які дозволяють механізувати та автоматизувати процеси переміщення деталей. У цьому контексті особливу роль відіграють маніпулятори з механічним захватом, які здатні забезпечити точне, надійне й відтворюване позиціювання заготовок.

Маніпулятори широко використовуються як у складі автоматичних ліній, так і як автономні пристрої, що взаємодіють із обробними центрами, верстатами, транспортерами тощо. Проте ефективність їх роботи значною мірою залежить від правильного конструктивного рішення. Від компоновки механічної частини, типу приводу, параметрів кінематичних ланок, конструкції захватного механізму та інших вузлів залежать такі ключові характеристики, як вантажопідйомність, робоча зона, точність, жорсткість і надійність пристрою. Особливої уваги заслуговує оптимізація конструкції з точки зору простоти виготовлення, експлуатації та обслуговування.

У сучасних умовах промисловості зростає потреба у розробці компактних, ефективних та доступних за вартістю маніпуляторів, які можуть бути інтегровані у вже існуюче обладнання без необхідності кардинальної перебудови виробничих ліній. Таким чином, проектування маніпулятора з механічним захватом, який відповідає конкретним виробничим вимогам, є

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

актуальним завданням сучасної інженерної практики, що поєднує знання в галузі механіки, машинознавства, конструктивного моделювання та прикладної механіки.

Серед великої кількості типів маніпуляторів особливе місце посідають ті, що мають механічний захват, адже саме вони забезпечують жорстке та безпечне утримання заготовок під час переміщення. Конструкція механічного захватного пристрою, його кінематичні особливості та принцип дії мають вирішальне значення для надійності всього маніпулятора. Вибір типу захвату, системи приводу, способу фіксації та адаптації до різних типів заготовок визначає функціональні можливості пристрою, його універсальність і точність.

З конструкторської точки зору, проектування маніпулятора передбачає вирішення комплексу взаємопов'язаних завдань: від формування загального компоновального рішення до розрахунків окремих вузлів на міцність і довговічність. Це потребує не лише знання загальних принципів машинознавства, але й уміння застосовувати сучасні інженерні інструменти, зокрема системи автоматизованого проектування (CAD), методи чисельного аналізу та принципи ергономіки.

Процес розробки конструкції включає вибір раціональної кінематичної схеми маніпулятора, визначення габаритних розмірів і параметрів ланок, розрахунок навантажень, визначення матеріалів та вузлів кріплення. У процесі проектування необхідно також враховувати специфіку технологічного середовища, тип і масу заготовки, необхідну точність позиціонування, а також вимоги до безпеки та зручності обслуговування пристрою.

Об'єкт дослідження – маніпулятор з механічним захватом, призначений для переміщення заготовок у виробничих умовах.

Предмет дослідження – конструкція маніпулятора та його окремих вузлів, зокрема механічного захвату, кінематичної схеми та несучих елементів.

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мета роботи – розробити конструкцію маніпулятора з механічним захватом для автоматизованої подачі заготовок, що забезпечує точність, жорсткість, надійність та простоту виготовлення в умовах серійного виробництва.

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

1. Теоретичні основи моделювання та керування робототехнічними маніпуляторами.

1.1. Аналіз типів маніпуляторів і вибір оптимальної схеми

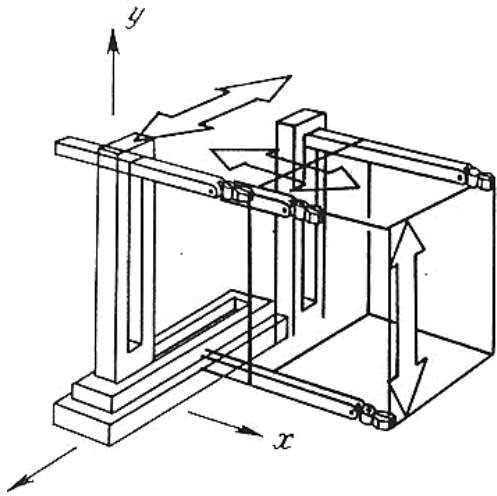
Одним із перших завдань, яке постає перед інженером при створенні маніпулятора, є вибір його кінематичної структури, тобто конфігурації механічної основи.

У більшості випадків під час взаємодії з об'єктами маніпулятори повторюють рухи людської руки. Тому кінематична будова маніпулятора повинна забезпечувати рухи, подібні до рухів руки людини.

Щоб забезпечити доступ до будь-якої точки робочої зони, маніпулятор має мати щонайменше три ступені свободи. Кожен із цих ступенів руху забезпечується окремим приводом, завдяки чому виконавчий орган здійснює точний керований рух. У сучасних конструкціях застосовують різні типи приводів: електромеханічні, пневматичні, гідравлічні або їх комбінації.

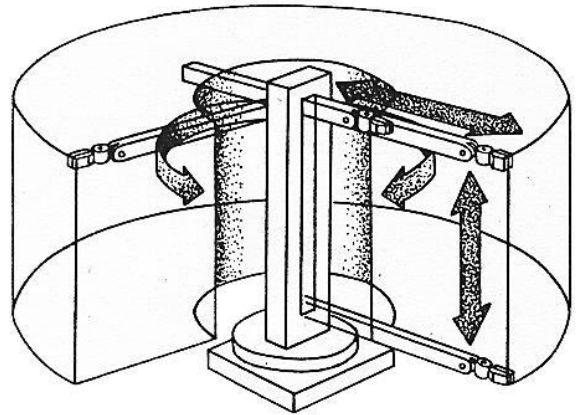
Існує багато різновидів кінематичних схем маніпуляторів, які реалізують рухи у просторі різними способами. Проте у промисловості найчастіше використовуються п'ять типових схем із простими кінематичними парами.

Таблиця 1. Основні типи маніпуляторів

Декартовий	
Це конструкція, яка працює в прямокутній системі координат. Вона вирізняється простотою управління та високою точністю позиціонування. Захват рухається поступально вздовж трьох осей: x , y та z , що відповідає напрямкам: ліво–право, вперед–назад і вгору–вниз.	

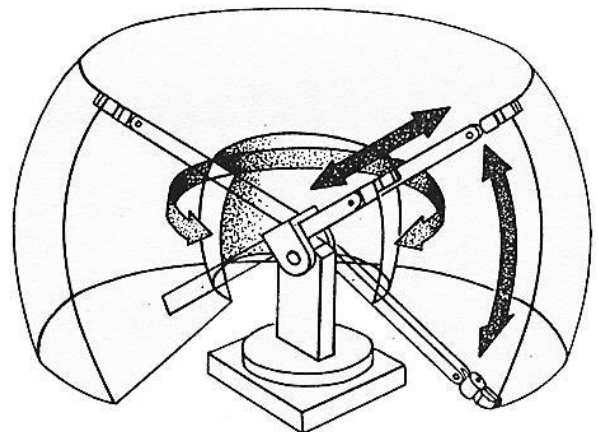
Циліндричний

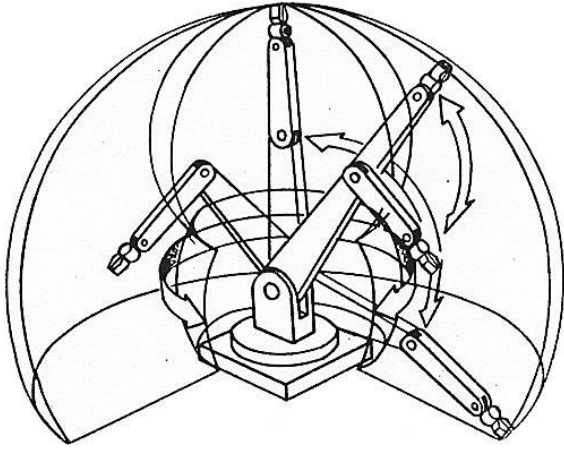
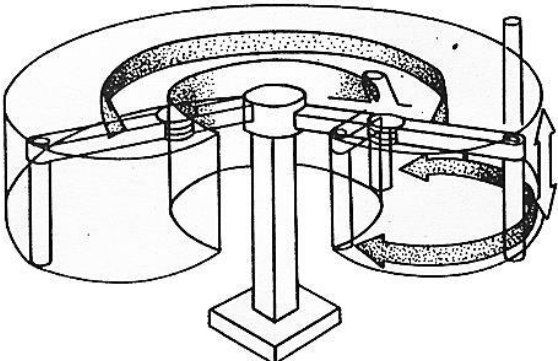
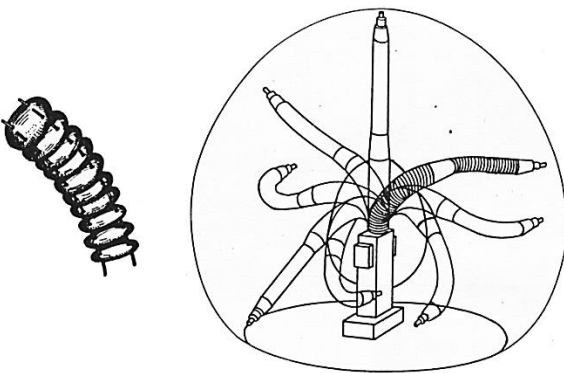
Маніпулятор, побудований на основі циліндричної системи координат. Його захват може рухатися телескопічно (висуватися і втягуватися), а також переміщуватися по вертикалі вздовж опорної стійки. Крім того, вся конструкція маніпулятора здатна обертатися навколо вертикальної осі основи. Однак це обертання обмежене неповним кутом повороту, що дозволяє виконувати робочі операції в межах циліндричної зони навколо маніпулятора.



Сферичний

Маніпулятор працює в сферичній або полярній системі координат. Його захват може висуватися, опускатися і підніматися шляхом повороту в «плечовому» вузлі. Вся конструкція також обертається навколо вертикальної осі. Робоча зона має форму усіченої сфери. Перші промислові роботи були побудовані саме за цією схемою.



Ангулярний	
<p>Шарнірний маніпулятор працює на основі обертальних кінематичних пар без поступальних рухів. За своєю будовою він нагадує людську руку, маючи аналоги плеча, ліктя та зап'ястя. Такий маніпулятор має велику робочу зону, може гнучко обходити перешкоди та навіть «складатися». Водночас керування ним є досить складним.</p>	
SCARA	
<p>Маніпулятор SCARA є різновидом маніпулятора з циліндричною системою координат. Усі його обертальні з'єднання розміщені в горизонтальній площині, що дозволяє рухатись подібно до складної ширми. Робоча зона має форму циліндра.</p>	
«Spine».	
<p>Маніпулятор типу «Spine», розроблений фірмою «Spine Robotics», має гнучку конструкцію у вигляді хобота з дисків, з'єднаних тросами. Натяг тросів керується гідроциліндрами. Система датчиків контролює положення. Робот вирізняється високою гнучкістю, маневреністю та великим радіусом дії</p>	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Маятниковий	
<p>Маніпулятор IRB 1000, створений компанією ASEA, має маятникову підвіску на подвійній карданній системі. Він переміщується вздовж поздовжньої та поперечної осей. За даними розробників, рухається в 1,5 раза швидше за класичні маніпулятори, що підвищує продуктивність.</p>	

Отже обрано розробку маніпулятора ангулярного типу, оскільки його конструкція ґрунтується на обертальних кінематичних парах, які є відносно простими у виготовленні та зручними для реалізації. Така система забезпечує широкий діапазон рухів і хорошу маневреність, що дозволяє ефективно працювати в умовах із перешкодами або складною траєкторією.

Разом з тим, управління ангулярним маніпулятором потребує точного розрахунку і синхронізації кутів обертання кожної ланки. Для забезпечення руху робочого органа у звичайній декартовій системі координат необхідно коректно перетворювати просторові координати у відповідні кути повороту. Похибки в кутових положеннях ланок мають властивість накопичуватись, що призводить до зниження точності кінцевого позиціонування.

Попри складність керування, ангулярна схема маніпулятора є оптимальним вибором для задач, де важливими є гнучкість рухів, адаптація до складних умов і великий робочий простір. Саме тому вона обрана як основа для реалізації у цьому проєкті.

									Арк.
									13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ				

1.2. Класифікація та конструктивно-функціональні ознаки робототехнічних маніпуляторів

Маніпулятори є основним класом робототехнічних систем і становлять понад 85 % усіх промислових роботів. Їх ефективне моделювання та керування на пряму залежать від типології, яка враховує функціональні можливості, конструкцію, тип приводу, ступінь автоматизації тощо.

Маніпулятори класифікуються за такими признаками.

1. Класифікація за функціональним призначенням:

Маніпулятори використовуються в різних галузях промисловості:

- *Керамічна промисловість* – формування, глазурування, завантаження/розвантаження печей;
- *Скляна, швейна, деревообробна промисловість* – подача матеріалів, складання, покриття;
- *Обробка шкіри, гуми, пластиків, азбесту* – транспортування, обробка, шліфування;
- *Харчова галузь* – розрізання продуктів (наприклад, м'яса).

2. За ступенем універсальності:

- *Універсальні* – виконують багато типів операцій;
- *Спеціалізовані* – налаштовані на обмежене коло задач;
- *Спеціальні* – орієнтовані на одну конкретну операцію.

3. За типом операцій:

- *Основні технологічні* – безпосереднє виготовлення, обробка;
- *Допоміжні* – обслуговування обладнання, транспортування.

4. За конструктивними ознаками:

- *Тип приводу* – електричний, пневматичний, гідравлічний;
- *Вантажопідйомність* – від надлегких (до 1 кг) до надважких (понад 1000 кг);
- *Робоча зона* – прямокутна, циліндрична, сферична, ангулярна;
- *Кількість кінцівок* – від одного до чотирьох маніпуляторів;
- *Мобільність* – стаціонарні або пересувні;

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- *Розміщення* – напільні, підвісні або інтегровані;
- *Виконання корпусу* – стандартне, захищене (від пилу, вологи, вибуху тощо).

5.3а типом керування:

- *Програмоване* – задана траєкторія або цикл;
- *Адаптивне* – з елементами зворотного зв'язку;
- *Інтелектуальне* – із застосуванням алгоритмів ШІ та навчання.

6.3а швидкістю та точністю:

1. Швидкість:

- *низька* – до 0,5 м/с;
- *середня* – 0,5–1 м/с;
- *висока* – понад 1 м/с.

2. Точність:

- *низька* – понад 1 мм;
- *середня* – 0,1–1 мм;
- *висока* – менше 0,1 мм.

7. Технічний рівень визначається за:

- Надійністю;
- Кількістю незалежних ступенів свободи;
- Часом налаштування/програмування;
- Енергетичною ефективністю (співвідношення потужності та маси);
- Вихідною потужністю відносно приводу;
- Габаритами та компактністю.

Функціональна класифікація маніпуляторів та покоління систем керування

1.3а характером виконуваних робіт маніпулятори поділяють на **універсальні та спеціальні:**

- *Універсальні* маніпулятори застосовуються для підйомно-транспортних операцій у машинобудуванні, а також для механізації обслуговування технологічного обладнання — наприклад,

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

установлення й знімання заготовок на металорізальних верстатах, виконання зварювальних, свердлильних та фрезерних операцій. Вони сумісні з різними типами устаткування та відзначаються широкою сферою використання.

- **Спеціальні** маніпулятори орієнтовані на виконання вузького кола технологічних задач, як-от маніпуляції у ковальсько-пресових, ливарних або зварювальних цехах. Їх конструкція оптимізована під конкретний тип роботи, що підвищує ефективність у межах заданого сценарію.

За способом керування маніпулятори поділяють на:

- **З ручним керуванням** – оператор безпосередньо контролює всі дії маніпулятора;
- **З автоматичним керуванням** – керування здійснюється за допомогою програм, сигналів від датчиків або систем зворотного зв'язку.

Працездатність маніпуляторів визначається низкою технічних характеристик:

- Робоча зона та зона обслуговування;
- Кількість ступенів свободи;
- Вантажопідйомність;
- Швидкість переміщення виконавчих органів;
- Енергоспоживання та енергоефективність.

Оскільки маніпулятори є складовими частинами промислових роботів, їх класифікаційні ознаки часто збігаються, а технічні характеристики формуються саме на основі особливостей маніпуляторної частини.

Покоління промислових роботів за рівнем керування:

1. **Перше покоління** – програмні роботи.

Це роботи, що виконують завдання за жорстко заданими алгоритмами. Вони не реагують на зміну умов і є найпоширенішими в класичному машинобудуванні.

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. *Друге покоління* – адаптивні роботи.

Такі роботи працюють за гнучкими програмами, здатні реагувати на зміну зовнішніх умов (наприклад, положення заготовки, перешкоди, зміни розмірів) завдяки використанню сенсорів і систем зворотного зв'язку.

3. *Третє покоління* – інтелектуальні роботи.

Вони здатні аналізувати ситуацію, приймати рішення та змінювати алгоритм дій у режимі реального часу. Такі системи використовують методи штучного інтелекту, машинного навчання та нейромережових підходів.

1.3. Аналіз систем керування маніпулятором

Системи керування є критичним елементом у структурі будь-якого робототехнічного маніпулятора. Від ефективності системи керування залежить точність, швидкодія, надійність і функціональна адаптивність всієї робототехнічної системи. У сучасних умовах, коли промисловість активно переходить до концепції Індустрії 4.0, інтелектуалізація систем керування є ключовою передумовою для гнучкого автоматизованого виробництва.

Загальна структура системи керування

Типова система керування маніпулятором включає такі основні елементи:

- Виконавчі пристрої (маніпулятор, приводи);
- Пристрої введення/виведення команд;
- Обчислювальний блок (контролер або ПК);
- Датчики (положення, зусилля, швидкості, температури тощо);
- Інтерфейси зв'язку (UART, CAN, I2C, Ethernet тощо).

Уся система побудована за принципами зворотного зв'язку: контролер отримує інформацію від датчиків, обробляє її згідно із заданим алгоритмом і передає сигнали керування до приводів.

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Види систем керування маніпулятором

Циклова система керування

Циклова система передбачає виконання фіксованої послідовності дій. Команди задаються не як координати, а як набір умов переходу: початок руху, умови зупинки, стан виконавчих механізмів. Швидкість і траєкторія руху не контролюються програмно.

Переваги: Простота реалізації; Невисока вартість.

Недоліки: Обмежена гнучкість; Низька точність позиціонування.

Позиційна система керування

У позиційному керуванні задаються координати ключових точок, між якими переміщується виконавчий орган. Швидкість переміщення, як правило, не регулюється, а сама траєкторія не контролюється між точками.

Переваги: Зручне для задач Pick-and-Place; Простота програмування.

Недоліки: Обмежене застосування у складних траєкторіях; Похибки при переході між точками.

Контурна система керування

Контурне керування дає змогу переміщувати маніпулятор за складними траєкторіями з високою точністю та заданими швидкісними режимами. Програма містить як координати, так і параметри руху (швидкість, прискорення).

Переваги: Висока точність і плавність руху; Підходить для обробки, зварювання, нанесення покриттів тощо.

Недоліки: Вища складність програмування; Потребує більшої обчислювальної потужності.

Адаптивна система керування

Це сучасний тип керування, який базується на принципах зворотного зв'язку та самоналаштування. Система реагує на зміни умов середовища або об'єкта маніпуляції в реальному часі.

Переваги: Гнучкість і надійність; Висока ефективність у складних умовах.

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки: Складність реалізації; Висока вартість обладнання і розробки.

Рівні ієрархії керування

У сучасних гнучких виробничих системах система керування має ієрархічну структуру:

1. Польовий рівень — датчики, виконавчі механізми, серводвигуни;
2. Контролерний рівень — мікроконтролери, ПЛК (програмовані логічні контролери);
3. Системний рівень — локальні ПК або промислові комп'ютери;
4. Управлінський рівень — MES/ERP-системи, що координують виробництво.

Реалізація системи керування у проєкті

У межах даної роботи реалізовано позиційну систему керування за допомогою мікроконтролера Arduino, що приймає сигнали з комп'ютера через СОМ-порт. Основні обчислення здійснюються на комп'ютері, а мікроконтролер відповідає за генерацію керувальних сигналів до сервоприводів.

Передбачено два режими роботи:

- Ручний режим — керування окремими ланками маніпулятора в реальному часі;
- Автоматичний (позиційний) режим — переміщення робочої точки між заданими координатами.

Цей підхід дозволяє спростити конструкцію, знизити вартість розробки та водночас забезпечити базову гнучкість у налаштуванні та модифікації алгоритмів.

Перспективи розвитку систем керування

У 2025 році пріоритетними напрямками розвитку є:

- Інтеграція штучного інтелекту в системи керування маніпуляторами;

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Використання цифрових двійників для симуляцій і тестування траєкторій;
- Розширення застосування мережевих протоколів реального часу (EtherCAT, TSN);
- Впровадження хмарних платформ для моніторингу та віддаленого керування;
- Застосування Low-code/No-code платформ для програмування промислових маніпуляторів непрофесійними користувачами.

Такі зміни свідчать про поступовий перехід до нової парадигми — інтелектуального децентралізованого управління, де кожен елемент системи може адаптуватися, навчатися та приймати рішення автономно.

Таким чином, аналіз систем керування маніпуляторами демонструє широкий спектр архітектур, функцій та рівнів складності, а також підкреслює важливість вибору оптимальної стратегії керування залежно від задачі, середовища й технічних можливостей.

1.4 Сучасні підходи до моделювання маніпуляторів

Моделювання є основоположним етапом у процесі проектування робототехнічних маніпуляторів. У 2025 році моделювання не лише зменшує витрати на фізичні експерименти, а й дозволяє на етапі розробки врахувати усі ключові кінематичні, динамічні та конструктивні особливості майбутнього пристрою.

За допомогою комп'ютерної динамічної моделі можна:

- визначити робочий простір та межі руху кожного ланцюга;
- оцінити сили, моменти та напруження у вузлах;
- перевірити коректність кінематичних зв'язків;
- здійснити віртуальне тестування систем керування.

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Види моделей

Сучасні методи моделювання поділяються на математичні та комп'ютерні (віртуальні). Обидва підходи використовуються як окремо, так і в комбінації для підвищення достовірності та точності.

Математичне моделювання

Для побудови математичної динамічної моделі застосовуються класичні підходи механіки:

- Лагранжева механіка — побудова узагальнених рівнянь динаміки на основі скалярної функції Лагранжа;
- Ньютонівська механіка — векторний опис динаміки твердих тіл.

У практиці моделювання маніпуляторів переважають дві основні методики:

- Метод Лагранжа-Ейлера — забезпечує уніфікований аналітичний підхід, зручний для побудови систем рівнянь динаміки, але малоефективний при обчисленнях через використання матриць однорідних координат.
- Метод Ньютона-Ейлера — використовує рекурентні векторні рівняння, що дозволяє ефективно обчислювати сили і моменти для кожного ланцюга, починаючи з кінцевого та завершуючи базовим.

Перевага методу Ньютона-Ейлера — в його високій обчислювальній ефективності, що робить його придатним для вбудованих систем реального часу.

Комп'ютерне моделювання

Комп'ютерне (віртуальне) моделювання використовується для створення цифрових прототипів маніпуляторів. Найпоширеніші програмні середовища:

- MSC.ADAMS — моделювання динаміки механізмів;
- Siemens NX, CATIA, SolidWorks Motion — побудова кінематичних схем, аналіз напружень;

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– MATLAB/Simscape Multibody — інтеграція з алгоритмами керування.

Процес моделювання включає:

1. Створення геометричної моделі (розміри, матеріали, з'єднання);
2. Налаштування початкових умов і прикладених сил;
3. Проведення симуляції та аналіз результатів (швидкості, прискорення, навантаження);
4. Оптимізацію критичних параметрів для досягнення стабільної та надійної роботи.

Комп'ютерне моделювання дозволяє значно скоротити цикл розробки, протестувати альтернативні конструкції без потреби у виготовленні фізичних прототипів і забезпечити тісну інтеграцію з системою керування.

Моделювання у межах даної роботи

У межах цього дослідження буде реалізовано обидва підходи:

- Математична модель динаміки буде побудована на основі рівнянь Лагранжа-Ейлера, що дозволить отримати уявлення про силові навантаження в кожному зчленуванні;
- Цифровий прототип маніпулятора буде реалізований у середовищі MSC.ADAMS, що забезпечить точне моделювання просторових рухів, взаємодії елементів і виявлення слабких місць конструкції.

Це дозволить порівняти результати двох типів моделювання, уточнити параметри конструкції та обґрунтувати вибір найефективнішої кінематичної схеми.

Перспективи розвитку моделювання в робототехніці

У 2025 році активно розвиваються такі напрями моделювання:

- Інтеграція цифрових двійників з реальними системами для прогнозування зносу і оптимізації сервісу;
- Симуляція поведінки роботів у хмарному середовищі;

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Використання нейромережових моделей для оцінки складних динамічних ефектів;
- Автоматизоване генерування кінематичних схем за допомогою AI;
- Візуальне програмування динаміки (графічні середовища без коду).

Усе це формує новий стандарт цифрового проєктування, де моделювання є не лише інструментом перевірки, а й основою розумного синтезу робототехнічних рішень.

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

2.Обґрунтування вимог, структурно-кінематичний синтез та вибір приводів маніпулятора.

2.1.Вимоги до маніпулятора

У рамках даного дипломної роботи проектування маніпулятора з механічним захватом передбачає формулювання чітких функціональних, конструктивних та програмно-апаратних вимог, які забезпечують його ефективну роботу в умовах автоматизованої подачі заготовок. Особливу увагу приділено забезпеченню надійної керованості, точності позиціонування, достатньої вантажопідйомності та узгодженості з іншими елементами автоматизованої технологічної системи.

Конструкція маніпулятора повинна забезпечувати стабільність роботи при виконанні циклічних операцій подачі заготовок. Основний модуль повинен обертатися навколо вертикальної осі та мати можливість жорсткого кріплення до горизонтальної монтажної поверхні. Робочий орган маніпулятора передбачає використання двох послідовно з'єднаних ланок однакової довжини (приблизно по 200 мм), що забезпечують необхідну робочу зону. Для здійснення захоплення та утримання заготовок передбачено механічний захват, розрахований на роботу з об'єктами діаметром до 70 мм і малою масою, типових для подачі в обробні зони верстатів або автоматичних ліній.

З кінематичної точки зору, проєктована конструкція реалізує триланкову схему з обертальними ступенями свободи, що дозволяє забезпечити необхідну маневреність і гнучкість траєкторії руху. На етапі геометричного моделювання створюється тривимірна модель у середовищі автоматизованого проєктування (SolidWorks або NX), у якій передбачено обмеження кутів повороту кожної з ланок відповідно до конструктивних особливостей та вимог безпеки експлуатації.

Оцінка динамічних характеристик маніпулятора виконується шляхом побудови обчислювальної моделі в середовищі динамічного аналізу,

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наприклад, MSC.ADAMS. У межах цього етапу розраховується робоча зона, швидкості й прискорення окремих елементів конструкції, сили та моменти в шарнірах, а також визначається гранична вантажопідйомність пристрою в залежності від положення робочої точки.

Система керування проєктується на базі мікроконтролера Arduino з підключенням до персонального комп'ютера через COM-порт, що забезпечує гнучкість при налаштуванні й тестуванні. Розробляється програмне забезпечення, функціонал якого включає можливість ручного керування обертанням окремих ланок та захвату, позиціонування робочої точки за координатами X, Y, Z у декартовій системі, регулювання швидкості руху, а також формування програм із проходженням заданих траєкторій у автоматичному режимі.

Після завершення проєктних та модельних етапів виконується оцінка ефективності запропонованого рішення. Аналізується точність позиціонування, швидкодія та вантажопідйомність, проводиться валідація отриманих характеристик відповідно до поставлених технічних вимог. Практичне тестування розробленого програмного забезпечення дозволяє перевірити адекватність алгоритмів керування в умовах реальної експлуатації. У завершальному розділі узагальнюються результати виконаної роботи, виокремлюються її переваги та виявлені конструктивні обмеження, а також пропонуються напрями подальшої оптимізації системи для покращення функціональних та експлуатаційних показників маніпулятора.

2.2.Формування структурно-кінематичної схеми маніпулятора

Перед створенням тривимірної моделі конструкції необхідно розробити структурно-кінематичну схему маніпулятора. На першому етапі визначено тип маніпулятора — ангулярний, що базується на обертальних кінематичних парах. Такий тип обрано через простоту реалізації, ефективне охоплення робочої зони та здатність обходити перешкоди завдяки гнучкості рухів.

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно з технічними вимогами, конструкція передбачає три ступені свободи: обертання основи навколо вертикальної осі та обертання двох з'єднаних між собою ланок. Для підтримання правильної орієнтації захоплювача під час рухів у схему введено додатковий механізм стабілізації положення захоплення.

Розроблена кінематична схема триступеневого маніпулятора представлена на рисунку 3.1. На схемі позначено першу та другу ланки, які здійснюють обертання на кути q_1 та q_2 відповідно, основу, що обертається на кут q_0 , а також захват. Додатково вказано довжини усіх частин маніпулятора, що дозволяє точно визначити робочий простір конструкції та провести подальший кінематичний аналіз.

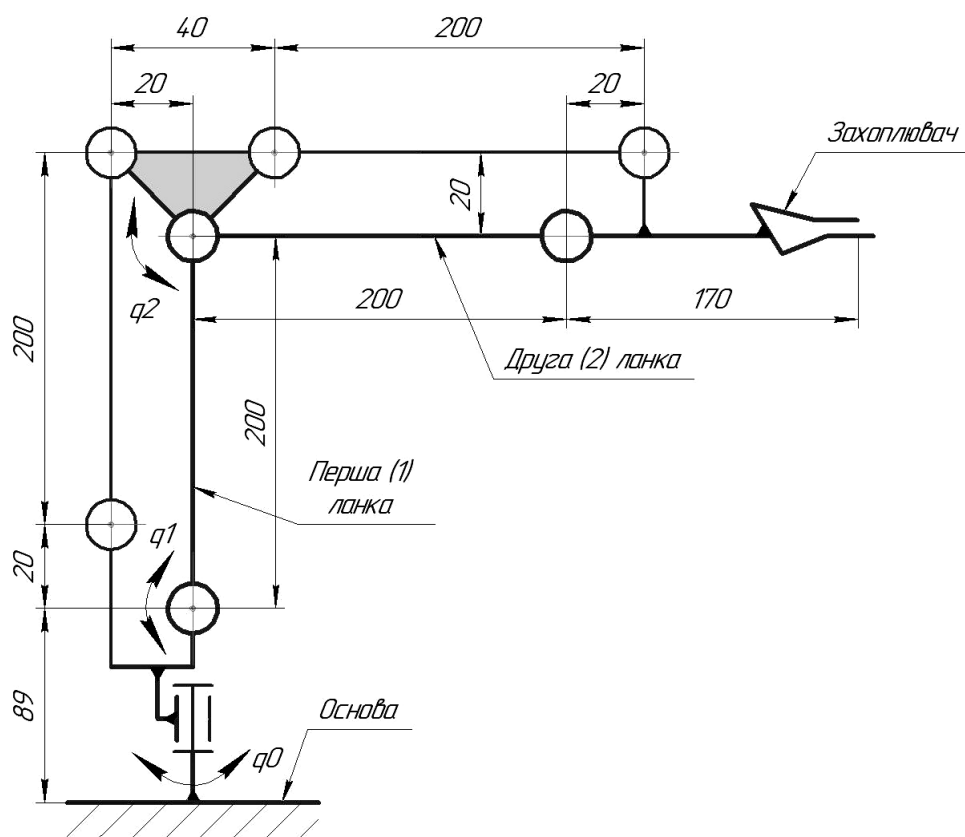


Рис 3.1 - Кінематична схема триступеневого маніпулятора

У цій кінематичній схемі передбачено використання додаткових ланок і з'єднань, які формують паралельний механізм. Його призначення — забезпечити стабільну орієнтацію захоплювача: він залишається паралельним до основи незалежно від того, на які кути q_1 та q_2 повертаються основні

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ				

ланки. Це важлива властивість для точного захоплення, переміщення та встановлення об'єкта з вертикальною орієнтацією.

На рисунках 3.2(а, б, в, г) схематично показано принцип дії паралельного механізму: під час зміни положення ланок захоплювач зберігає своє просторове положення паралельно до основи. Це дозволяє обійти необхідність додавання третього керованого ланцюга для повороту захоплювача.

Попри наявність багатьох шарнірних з'єднань, у конструкції використовується лише три сервоприводи, розміщені в точках повороту ланок (q_0 , q_1 , q_2), і ще один сервопривід для керування зведенням/розведенням захоплювача.

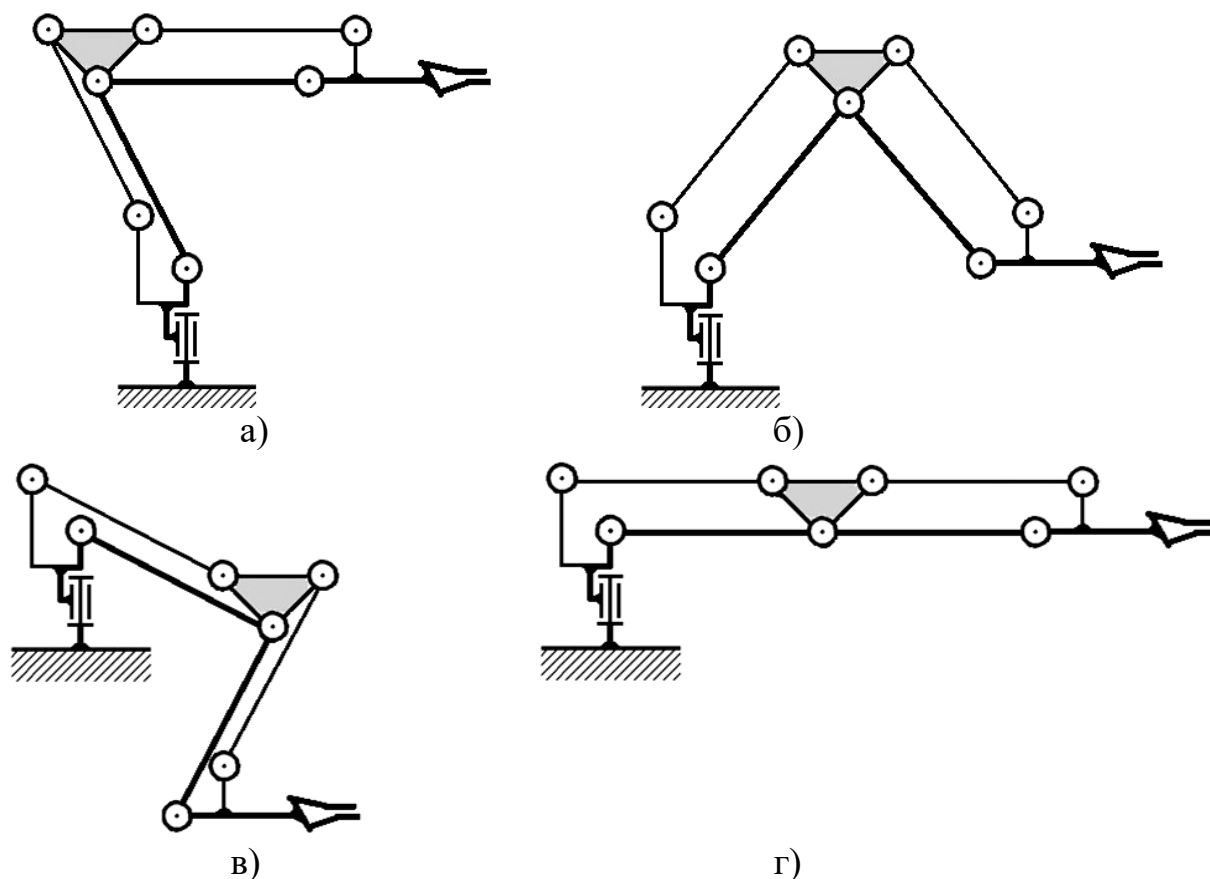


Рис. 3.2 - Схематична візуалізація принципу дії паралельного механізму

Таким чином, кінематична схема забезпечує спрощену, проте функціонально ефективну архітектуру, яка відповідає вимогам до гнучкості, точності та керованості.

									Арк.
									27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ				

2.3. Аналіз прямої та оберненої кінематики маніпулятора з реалізацією розрахунків у середовищі Mathcad

Розглядаємо задачу прямої та зворотної кінематики маніпулятора. Пряма кінематична задача полягає у визначенні положення всіх ланок і робочої точки маніпулятора за відомими геометричними параметрами конструкції та кутами повороту шарнірних з'єднань. Натомість зворотна задача передбачає обчислення необхідних кутів повороту ланок для досягнення заданого положення робочого органа у просторі.

Для вирішення обох задач сформовано математичну модель із використанням тригонометричних залежностей між кутами обертання, довжинами ланок і координатами кінцевої точки. На основі цієї моделі побудовано структурну схему з позначенням усіх змінних та параметрів, що використовуються в розрахунках.

Реалізація розрахунків виконана у середовищі *Mathcad*, що дозволяє проводити як символічні, так і числові обчислення, візуалізувати залежності між параметрами та перевіряти правильність отриманих рішень. Результатом цього етапу є визначення конфігурацій маніпулятора для заданих положень або, навпаки, побудова траєкторії руху кінцевої ланки на основі змін кутів повороту.

Такий підхід дозволяє точно формалізувати поведінку маніпулятора та забезпечує основу для подальшої розробки системи керування та автоматичного позиціонування.

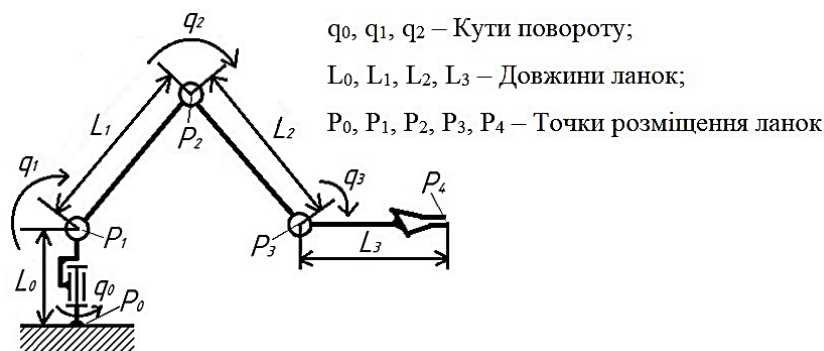


Рис. 2.3.1. - Структурна схема з позначеннями, необхідними для кінематичного аналізу

						Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	

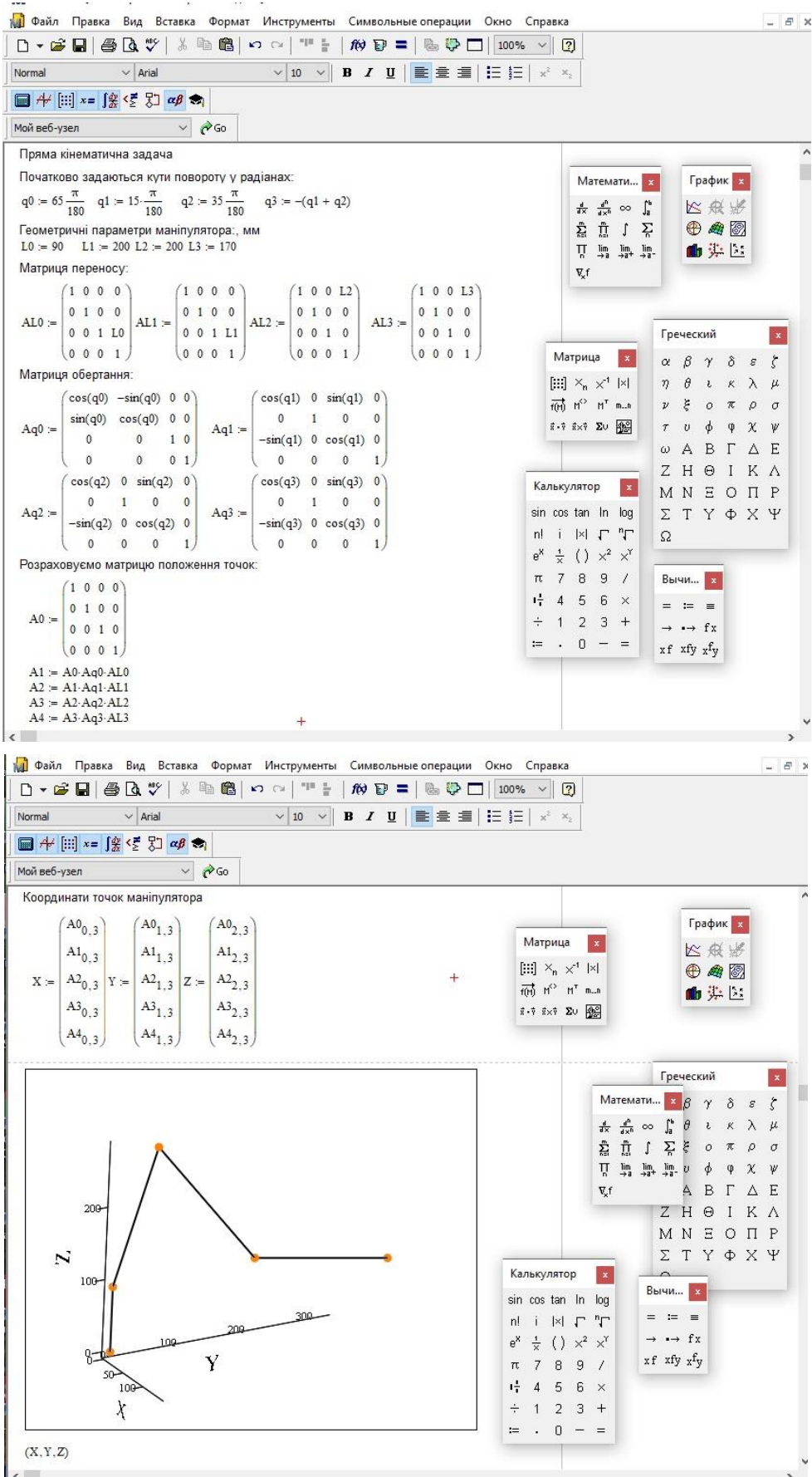


Рис. 2.3.2. - Пряма кінематична задача для аналізу положення ланок маніпулятора при відомих кутах повороту та довжинах сегментів в середовищі Mathcad.

Зворотна кінематична задача

Попередньо задаються ті ж самі довжини ланок:
 $L_0 := 90$ $L_1 := 200$ $L_2 := 200$ $L_3 := 170$

Відомими є координати точки захвата:
 $x := A^4_{0,3} = 148.052$
 $y := A^4_{1,3} = 317.499$
 $z := A^4_{2,3} = 129.976$

Після цього виконується послідовний аналіз:

1. Визначаємо проекцію точки P4 (кінцевої точки маніпулятора) на площину OXY
 $x_0 := \sqrt{x^2 + y^2}$
2. Розраховується проекція точки P3 (передостанньої ланки маніпулятора) також на площину
 $x1 := x - L_3$
3. Зміщуємо вниз координату z точки P3 на площину XY:
 $z1 := z - L_0$
4. Знаходимо відстань між початком координат і точки P3
 $B := \sqrt{x1^2 + z1^2}$
5. Знаходим кут q_0
 $q_0 := \text{asin}\left(\frac{y}{x}\right) = 1.134$

Перше і друге ланки разом із відрізком B утворюють трикутник. Оскільки довжини всіх його сторін відомі, можна розрахувати внутрішні кути цього трикутника за допомогою тригонометричних формул. Знаходим кут q_{01}

$$q_{01} := \text{acos}\left(\frac{L1^2 + B^2 - L2^2}{2 \cdot B \cdot L2}\right) = 1.091$$

Визначаємо кут q_{0r}

$$q_{0r} := \text{acos}\left(\frac{L1^2 + L2^2 - B^2}{2 \cdot L1 \cdot L2}\right) = 0.96$$

Знаходим кут q_{02}

$$q_{02} := \text{asin}\left(\frac{z1}{B}\right) = 0.218$$

Знайшовши кути трикутника можна визначити кути поворотів ланок

$$Q1 := \frac{\pi}{2} - q_{01} - q_{02}$$

$$Q2 := \frac{\pi}{2} - q_{0r}$$

Визначаємо кути в градусах

$$q_{00} := Q0 \cdot \frac{180}{\pi} = 65$$

$$q_{01} := Q1 \cdot \frac{180}{\pi} = 15$$

$$q_{02} := Q2 \cdot \frac{180}{\pi} = 35$$

Рис. 2.3.3. - Зворотна задача кінематики (полягає у визначенні необхідних кутів повороту ланок за заданими координатами положення робочого органа (захвата) маніпулятора.) в середовищі Mathcad.

									Арк.
									30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Виконані розрахунки показують, що підстановка координат із прямої задачі у формули зворотної задачі дозволяє отримати ті самі значення кутів, які були задані на початку. Це свідчить про правильність побудованої математичної моделі та достовірність результатів обох кінематичних розрахунків.

2.4.Обґрунтування вибору серводвигунів для приводу маніпулятора

Поворот ланок маніпулятора, а також стиснення та розтискання захвата здійснюватимуться за допомогою цифрових сервоприводів. При довжині кожної з двох ланок 200 мм та з урахуванням габаритів захвата орієнтовна максимальна довжина маніпулятора становитиме приблизно 570 мм.

Для визначення потужності, яку має забезпечувати сервопривід для підняття маніпулятора, необхідно оцінити загальну масу конструкції. Приблизна маса одного сервопривода становить 60 г. Оскільки в конструкції передбачено використання трьох сервоприводів, їх сумарна маса дорівнює 180 г. Решта елементів — ланки та захват — виготовлятимуться з пластику та металу, тому орієнтовна повна маса маніпулятора без урахування основи складатиме близько 500 г.



Припускаючи, що маса розподілена рівномірно по всій довжині конструкції, можна вважати, що ефективна маса в робочій точці (на кінці маніпулятора) дорівнює приблизно 250 г за умови горизонтального розташування ланок і вертикального напрямку сили тяжіння.

За умови, що маса в робочій точці маніпулятора становить 250 грамів, а загальна довжина конструкції — 57 см, обчислений момент на валу сервопривода дорівнює приблизно 14,25 кг*см. При цьому передбачається, що захват не несе додаткового навантаження (тобто працює без вантажу).

Отримане значення моменту є критичним для вибору відповідного сервопривода, який повинен мати запас по тяговому зусиллю для забезпечення надійної та стабільної роботи пристрою.

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця - Вибір серводвигунів для приводу маніпулятора

Перша ланка маніпулятора	
Сервопривід <i>DF15RMG</i>	
	<p>Кут повороту: 170° Швидкість повороту: 60° за 0,16 с Обертний момент: 19,3 кг·см при 7,4 В Металеві шестерні Розміри: 40 × 40 × 20 мм Маса: 65 г Робоча напруга: 5–7,4 В Максимальний струм: 3 А при 8,5 В Напруга PPM-сигналу: 3–5 В Роздільна здатність: 2 мкс Частота: до 4 кГц</p>
Друга ланка маніпулятора	
Сервопривід <i>RDS3115</i>	
	<p>Кут повороту: 180° Швидкість повороту: 60° за 0,16 с Обертний момент: 17 кг·см при 7,2 В Металеві шестерні Розміри: 40 × 40 × 20 мм Маса: 60 г Робоча напруга: 4,8–8,4 В</p>
Для роботи захвату і повороту	
Сервопривід <i>SR430</i>	
	<p>Робоча напруга: 6,0 – 7,4 В Швидкість: 0,18 с/60° при 6 В Зусилля на валу: 4,2 кг·см при 6 В Швидкість: 0,16 с/60° при 7,4 В Зусилля на валу: 5,3 кг·см при 7,4 В Кут обертання: 180° Розміри: 42 × 39,5 × 20,5 мм Маса: 44 г Шестерні редуктора: пластикові</p>

3. Проектування конструкції маніпулятора

3.1. Проектування деталей маніпулятора

Проектування першого та другого ланок маніпулятора

Сервоприводи DF15RMG вже оснащені стандартними монтажними кронштейнами (рис. 3.1.1.), тому конструкцію ланки необхідно спроектувати так, щоб вона забезпечувала надійне кріплення до цих елементів. Для цього у деталі слід передбачити відповідні монтажні отвори, аналогічні тим, що є в кронштейнах, аби забезпечити можливість з'єднання за допомогою болтів. Діаметр отворів становить 3 мм, а відстань між центрами – 10 мм.

Запропоновано виготовити деталь з алюмінієвої рейки, оскільки алюміній має вищу міцність і жорсткість порівняно з пластиком, краще витримує механічні навантаження та менш схильний до деформацій.

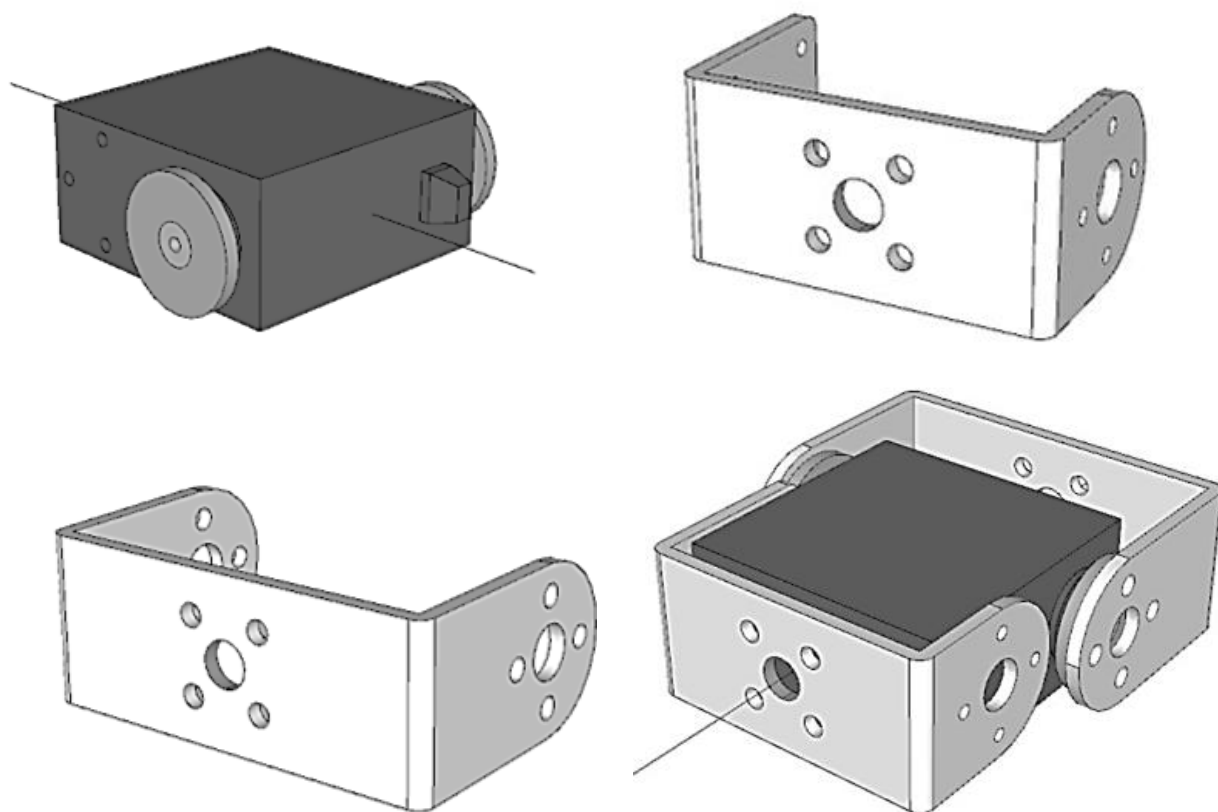


Рис. 3.1.1 - 3D-модель серводвигуна DF15RMG та його кронштейнів

Слід врахувати, що серводвигуни, з'єднані з рейкою, формують єдину ланку маніпулятора, яка повинна мати довжину 200 мм (рис. 3.1.2). Тому

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

довжину алюмінієвої рейки необхідно підібрати таким чином, щоб загальна довжина конструкції відповідала цій вимозі.

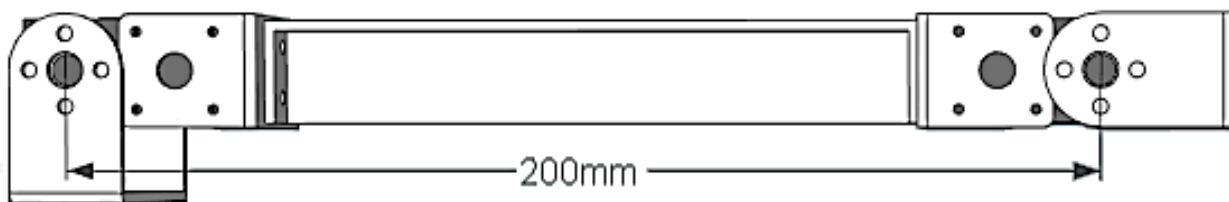


Рис. 3.1.2. - Конструкція першої ланки

У підсумку, для забезпечення загальної довжини першої ланки маніпулятора 20 см, довжина алюмінієвої рейки має становити 12,8 см (рис. 3.1.3), з урахуванням габаритів двох серводвигунів, що встановлюються з обох боків.

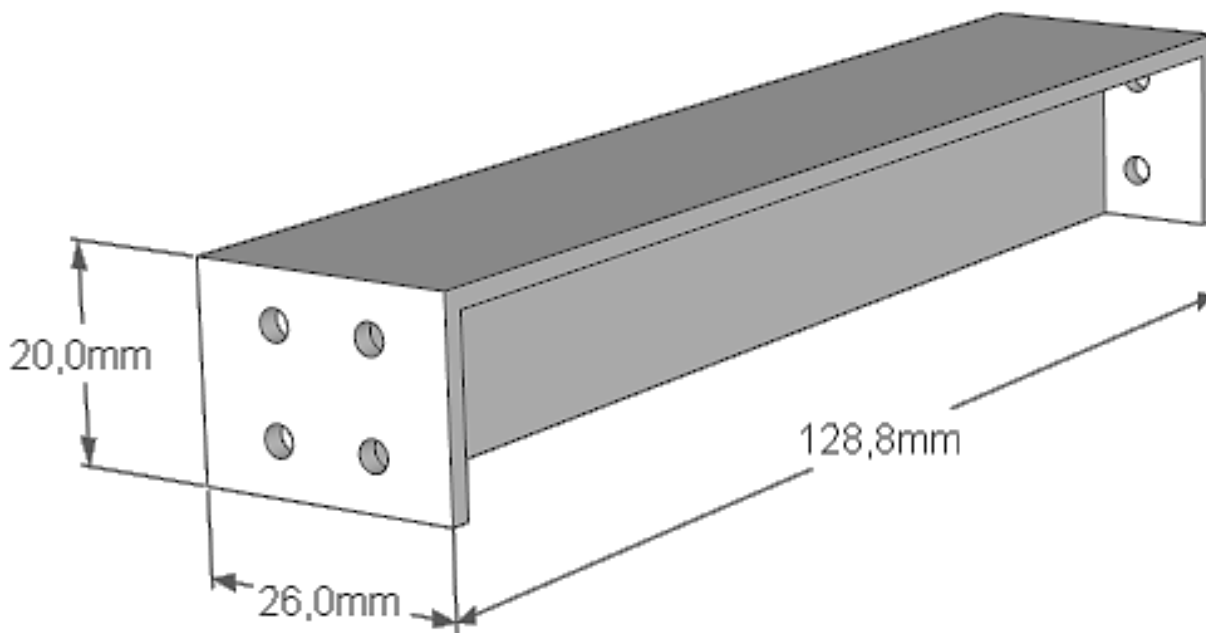


Рис. 3.1.3. - Тривимірне зображення деталі першої ланки з вказаними розмірами

Конструкція рейки для другої ланки аналогічна тій, що використовується в першій ланці, однак відрізняється довжиною. Другу ланку утворюють серводвигун, металева рейка та спеціальне кріплення для захвата. Відстань між віссю обертання серводвигуна та віссю кріплення захватного механізму становить 20 см, що й визначає довжину другої ланки (рис. 3.1.4).

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

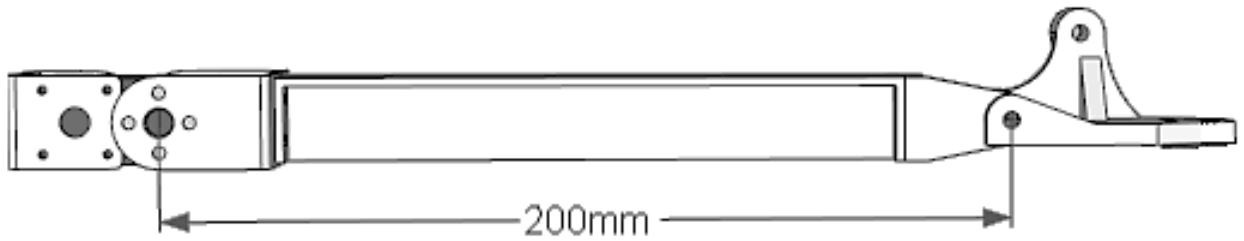


Рис. 3.1.4.- 3D-модель другої ланки маніпулятора

У результаті розрахунків визначено, що довжина рейки для другої ланки повинна становити 14,9 см (рис. 3.1.5), що забезпечує загальну довжину ланки 20 см з урахуванням габаритів серводвигуна та кріплення захвата.

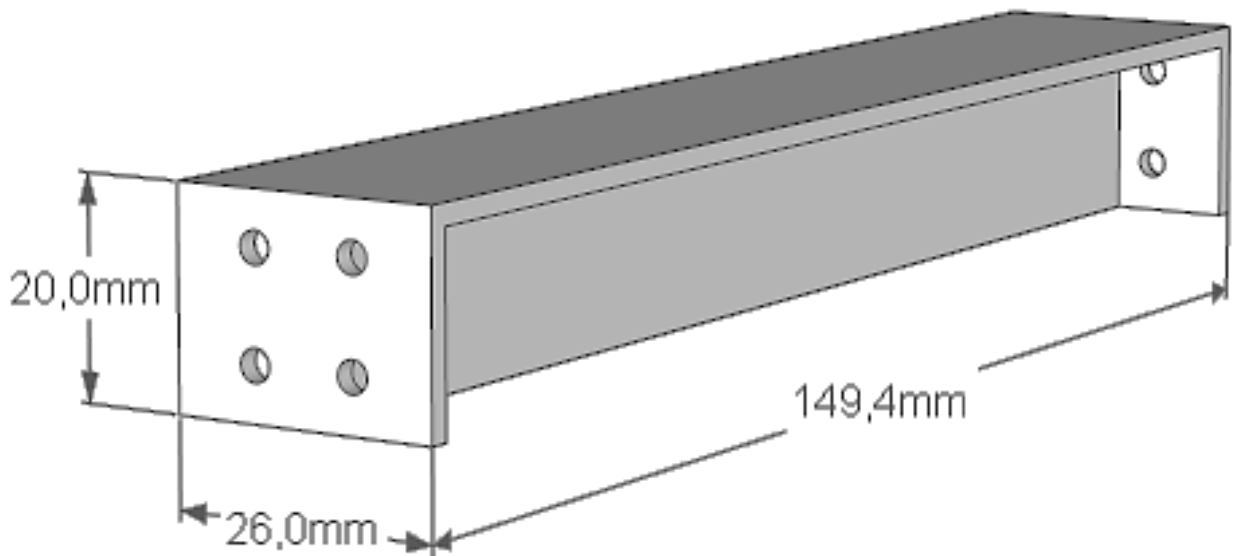


Рис. 3.1.5. - 3D-модель другої ланки з позначеними габаритними розмірами.

Проектування захватного механізму

Модель захвата буде розроблено на основі наявного креслення (рис. 3.1.6). Конструкція передбачає шість рухомих деталей, які встановлюються на загальне опорне оснування (рис. 3.1.7).

										Арк.
										35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ					

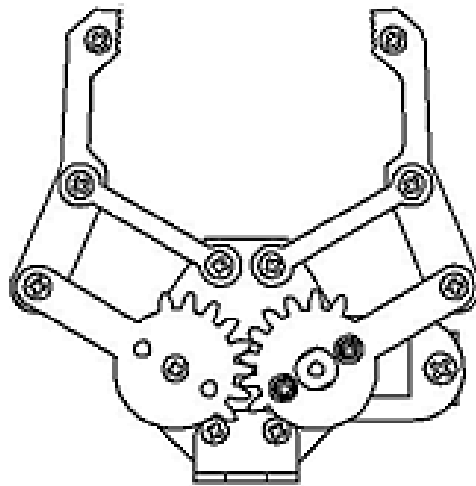


Рис. 3.1.6. Ескіз для побудови 3D-моделі захвата

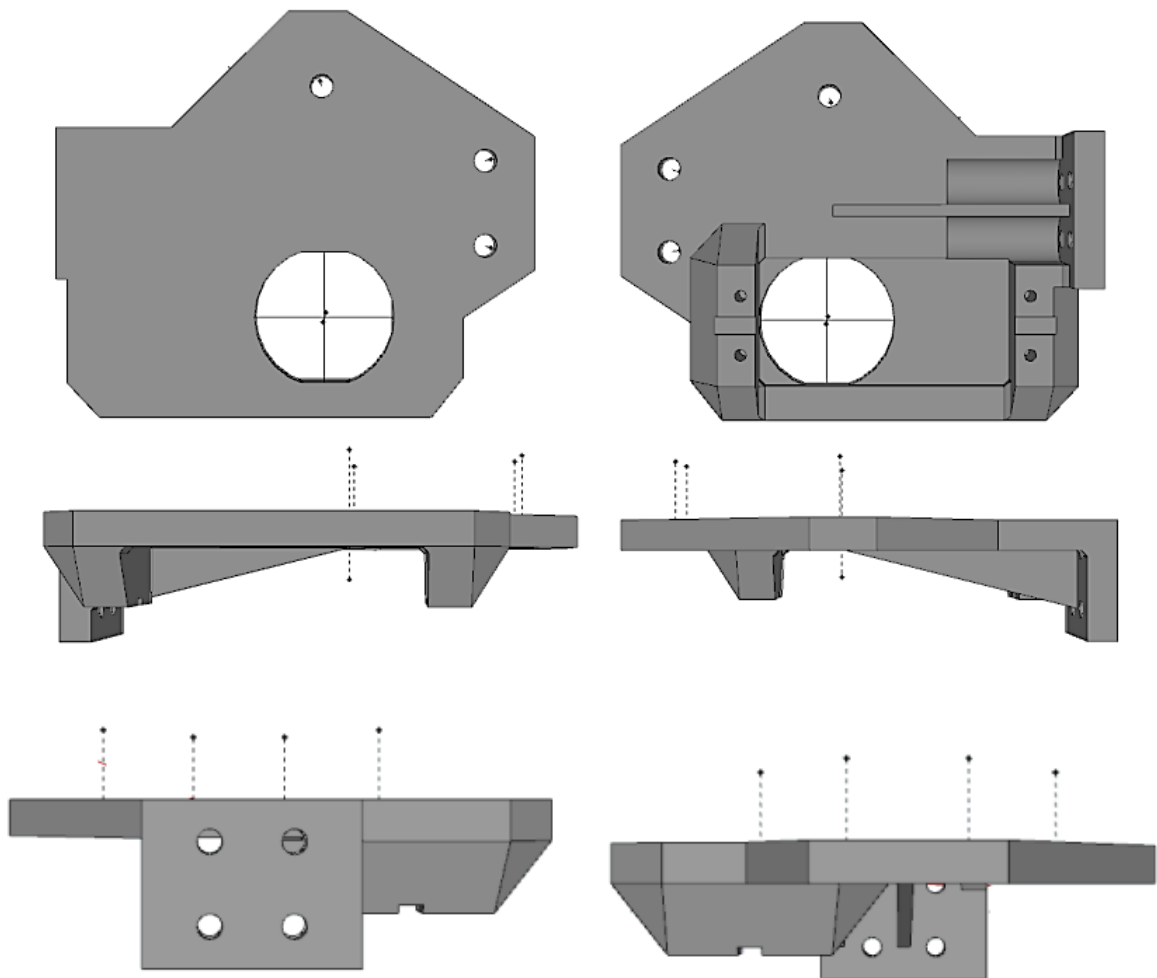


Рис. 3.1.7. Модель основи захвата з різних ракурсів

Порівняно з базовим кресленням було змінено розташування кріплення для серводвигуна, що дозволило збільшити кут розкриття захвата. Крім того, на кріпленні передбачено спеціальні опори для встановлення серводвигуна SR430. В основі також виконано технологічний отвір, який забезпечує

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

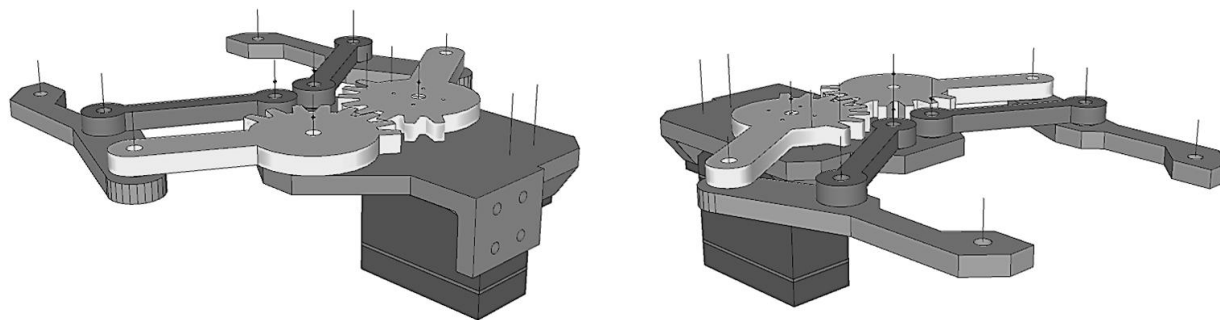


Рис. 3.1.9. 3D-модель зібраного захватного механізму з різних ракурсів
 Як показано на рисунку 3.1.10, загальна довжина захвата варіюється відповідно до кута його розкриття.

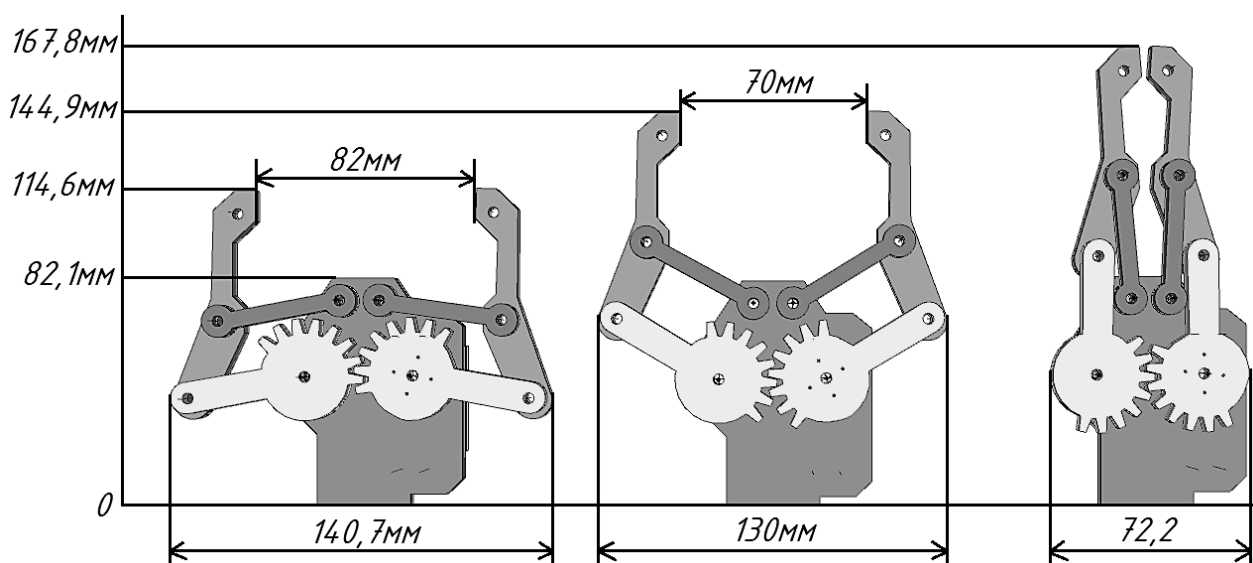


Рис. 3.1.10. Зміна положення захвата з відповідними габаритними розмірами

Конструктивне оформлення базового елемента маніпулятора

Основна частина маніпулятора сприймає найбільші навантаження, оскільки саме на неї припадає вага всієї конструкції та зусилля, що виникають під час її роботи. До конструкції основи висувається ряд технічних вимог: вона повинна мати можливість кріплення до горизонтальної поверхні; забезпечувати обертання навколо вертикальної осі за допомогою сервопривода **SR430**; бути достатньо жорсткою для витримування динамічних навантажень та досить стійкою, щоб уникнути перекидання.

З огляду на ці вимоги, під час проектування було вирішено виконати основу у вигляді циліндричного корпусу. Всередині неї передбачено посадкове місце для сервопривода з розташуванням його вала по центру

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

конструкції. Також у корпусі розміщено відповідні отвори для кріплення кронштейна першої ланки маніпулятора. Щоб реалізувати обертання, конструкція передбачає нижню опорну частину з монтажними отворами для фіксації на поверхні, до якої прикріплюється вал сервопривода. При обертанні вала верхня частина основи приводиться в рух відносно нерухомої нижньої частини.

Геометричні параметри та компонування елементів конструкції основи наведено на рисунку 3.1.11.

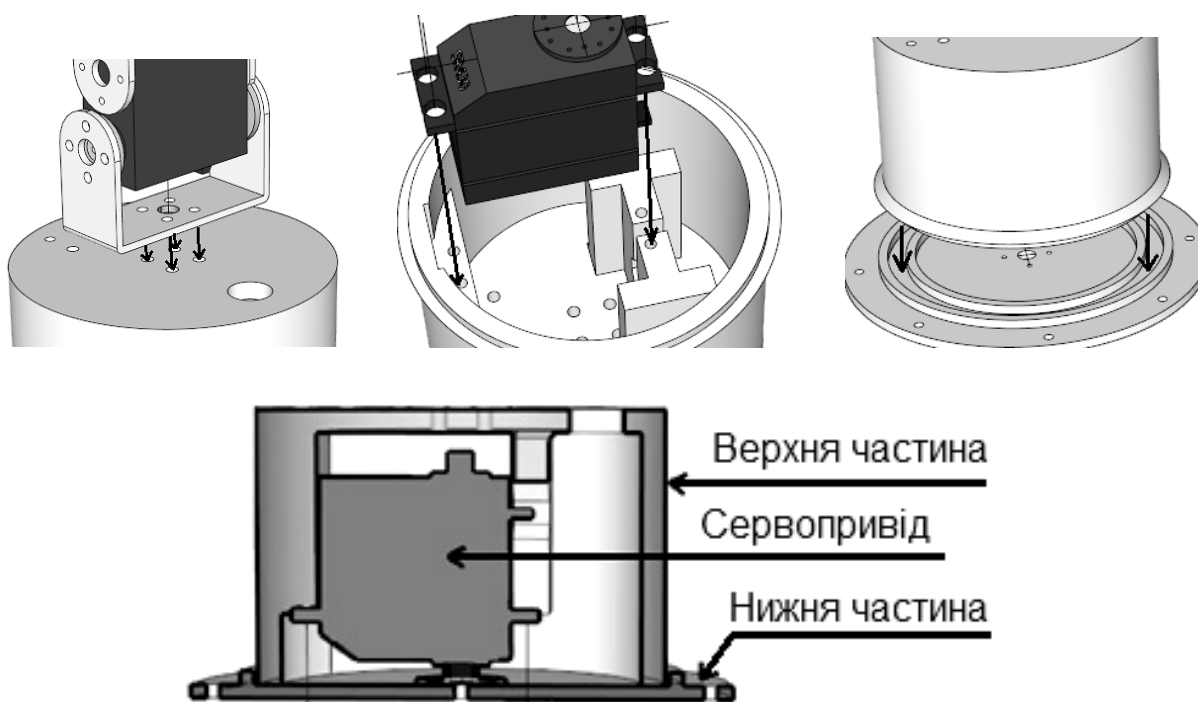


Рис. 3.1.11. Елементи конструкції основи

Проектування загальної конструкції маніпулятора

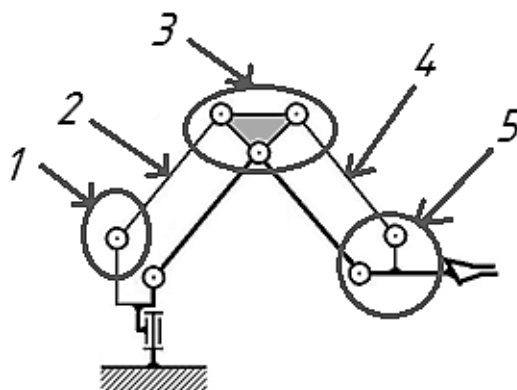


Рис. 3.1.12. Умовне позначення вузлів паралельної структури на схемі

									Арк.
									39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ				

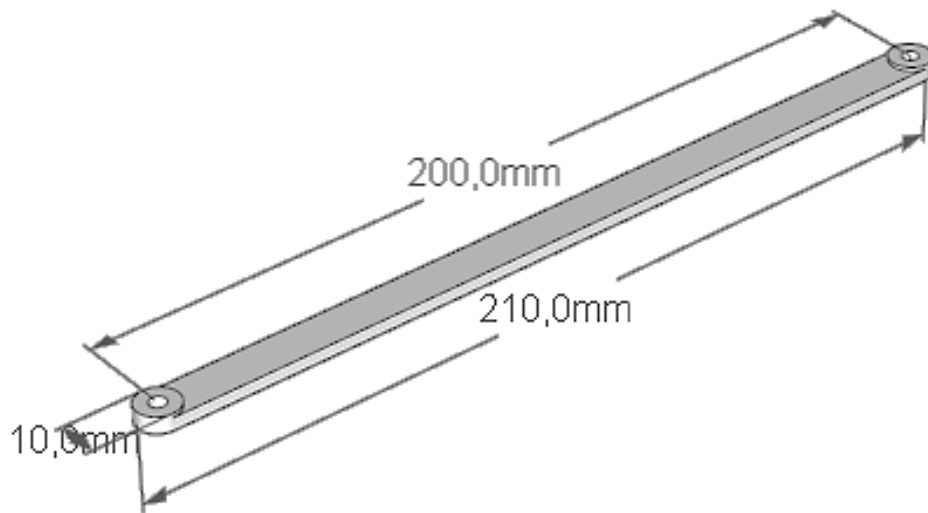


Рис. 3.1.13. Конструктивна модель додаткових ланок у складі паралельного механізму

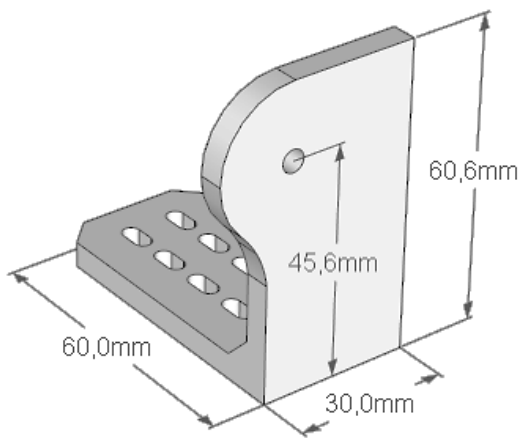


Рис. 3.1.14. 3D-модель елемента шарнірного вузла

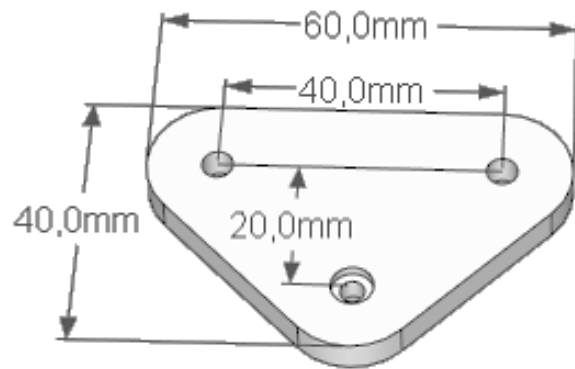


Рис. 3.1.15. 3D-модель центральної деталі паралельного механізму

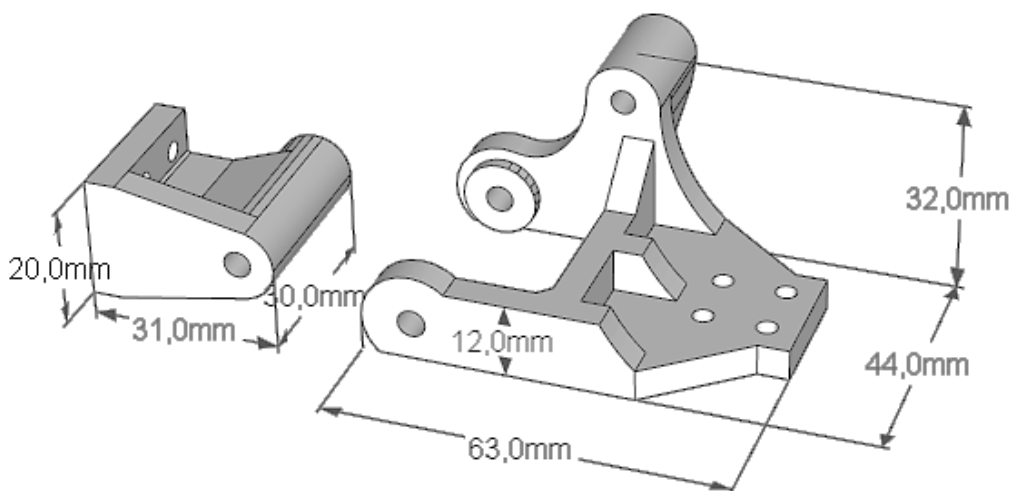


Рис. 3.1.16. Конструкція шарнірного з'єднання в області встановлення захватного механізму

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

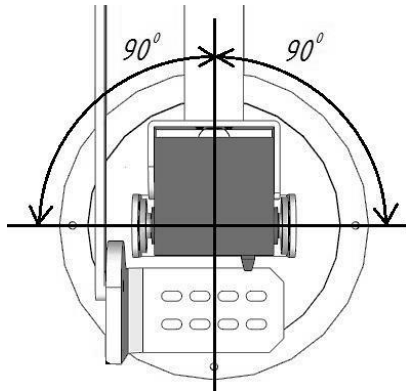


Рис. 3.2.1 Кут повороту
основи

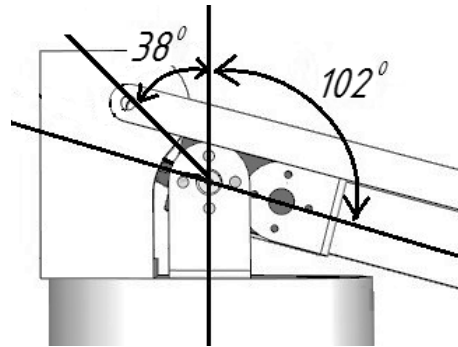


Рис. 3.2.2 Кут повороту
першої ланки

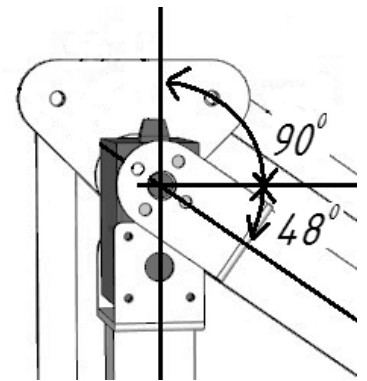


Рис. 3.2.3 Кут повороту
другої ланки

Кут повороту другої ланки q_2 : За обертання другої ланки відповідає серводвигун RDS3115, який має робочий діапазон повороту 180° . Конструкція маніпулятора дозволяє відхилити ланку на 48° в один бік та до 90° в інший — відносно початкового положення. Це формує асиметричний робочий діапазон, зумовлений геометричними обмеженнями конструкції (рис. 3.2.3).

Такий розподіл кутів був обраний для того, щоб максимально розширити робочу зону маніпулятора в передній площині, що є найбільш функціонально значущою для виконання типових операцій.

3.3. Аналіз робочої зони, вантажопідйомності маніпулятора

Робоча зона

Для аналізу робочої зони маніпулятора було реалізовано спеціальну функцію, яка поетапно обертала ланки моделі у межах допустимих значень кутів. У результаті цих обертань захват пройшов повний контур доступної робочої зони.

Координати точок, по яких переміщувався захват, були збережені, що дозволило побудувати робочу зону на координатних площинах. Контур робочої зони зображено на площині з осями OXZ (рис. 3.3.1) та на площині з осями OXY (рис. 3.3.2).

									Арк.
									42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ				

Вантажопідйомність маніпулятора

Вантажопідйомність маніпулятора визначається потужністю встановлених у ньому сервоприводів. Найбільше навантаження припадає на сервопривод DF15RMG, що забезпечує обертання першої ланки на кут φ_1 . Цей привід здатен створювати крутний момент на валу до 19 кг·см, що приблизно відповідає 1,86 Н·м.

Максимальна вантажопідйомність — це найбільша маса вантажу, яку маніпулятор здатен утримати у положенні з максимально витягнутою вперед ланкою.

Для визначення цього параметра модель маніпулятора встановлюється в положення з повністю розгорнутою "рукою" вперед. На вісь першої ланки прикладається момент $M=1,86 \text{ Н}\cdot\text{м}$ — граничне значення, яке може створити сервопривод. У цей момент захват утримує вантаж, маса якого поступово збільшується до тієї межі, коли моменту приводу вже недостатньо для його підйому.

В результаті експерименту встановлено, що максимальна маса вантажу, який здатен підняти маніпулятор, становить **150** г. При збільшенні маси до 160 г під дією моменту конструкція вже не може втримати вантаж і опускається вниз.

3.4.Проектування системи керування маніпулятором

Система керування маніпулятором реалізована на базі мікроконтролера Arduino Uno, який підключається до персонального комп'ютера через COM-порт. Через цей інтерфейс надходить як живлення, так і керуючі команди для приводу сервомоторів маніпулятора.

Чотири серводвигуни підключені до цифрових виходів Arduino: pin 6, pin 8 pin 10, pin 12 (рис. 3.4.1)

Живлення серводвигунів здійснюється від окремого зовнішнього джерела з номінальною напругою 7 В, а загальна земля (GND) прив'язана до

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контакту GND на Arduino, що забезпечує спільний електричний потенціал для всіх компонентів системи.

Призначення сервоприводів:

-Servo 0 (підключений до pin 6) — керує обертанням основи маніпулятора; модель SR430.

-Servo 1 (pin 8) — відповідає за обертання першої ланки; модель DF15RMG.

-Servo 2 (pin 10) — приводить у дію другу ланку; модель RDS3115.

-Servo 3 (pin 12) — забезпечує відкривання/закривання механічного захвата; також SR430.

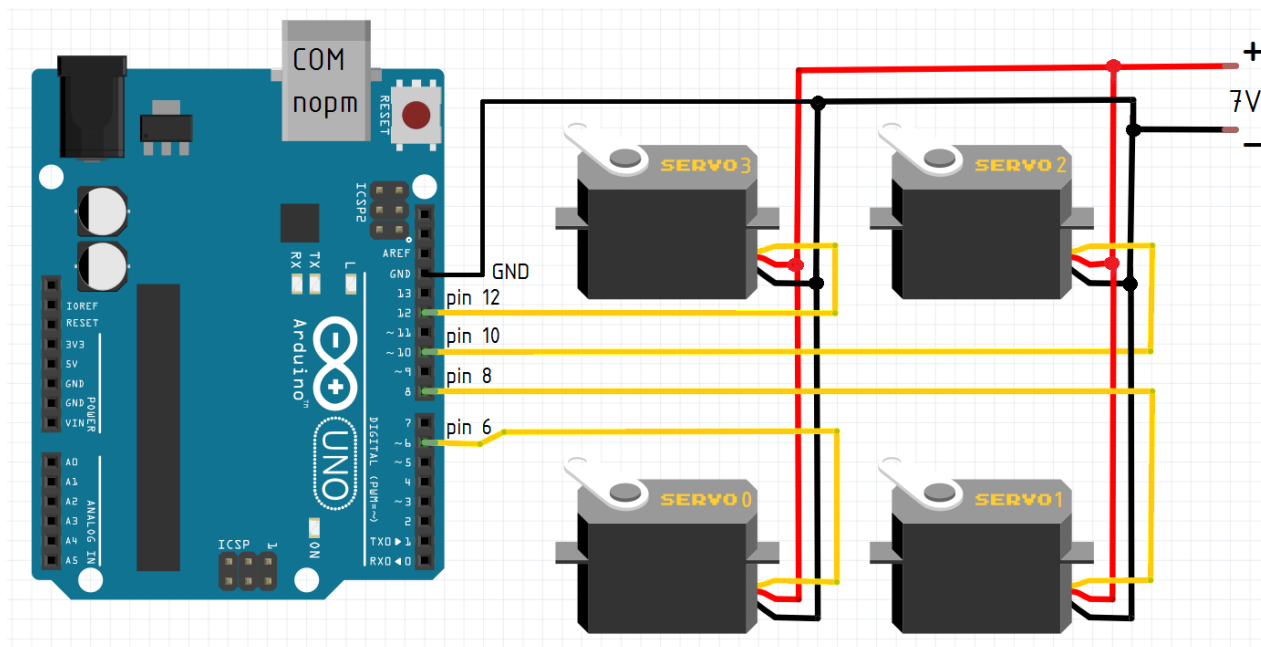


Рис. 3.4.1. Електрична схема підключення сервоприводів до контролера Arduino Uno

Після подачі живлення на плату Arduino, автоматично запускається вбудована програма, яка негайно надсилає сигнали на серводвигуни для переведення їх у початкове положення. Після цього програма переходить у режим очікування команд, що надходять через COM-порт з персонального комп'ютера.

Кожна команда є текстовим рядком, який містить значення кутів повороту для всіх сервоприводів маніпулятора. Щойно Arduino приймає

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

такий рядок, програма зчитує передані значення та формує сигнали керування з новими кутами, які надсилаються на відповідні серводвигуни.

Спрощена блок-схема алгоритму роботи програми Arduino подана на рисунку 3.4.2.



Рис. 3.4.2. Блок-схема роботи мікроконтролера Arduino в системі керування маніпулятором

Для реалізації керування маніпулятором було розроблено програму на платформі Arduino. Вона дозволяє приймати з комп'ютера через COM-порт кутові значення, які потім передаються на серводвигуни, що відповідають за

обертання кожного з вузлів конструкції: основи, першого й другого звена, а також механічного захвата.

Програма використовує бібліотеку Servo.h, яка забезпечує взаємодію з сервоприводами через цифрові виходи. Після запуску мікроконтролер автоматично встановлює усі приводи в початкове положення (90°), а потім переходить у режим очікування вхідної команди. Як тільки надходить текстовий рядок із заданими кутами повороту, Arduino розбиває його на окремі значення та надсилає відповідні сигнали керування на кожен сервопривод.

Цей алгоритм дозволяє точно позиціонувати елементи маніпулятора відповідно до координат, які задаються оператором або автоматизованою системою керування. (Див. додатки)

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У рамках виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було проведено повноцінний цикл інженерного проектування робототехнічного маніпулятора з механічним захватом, призначеного для автоматизованої подачі заготовок. Робота охоплює всі ключові етапи розробки — від теоретичного аналізу та обґрунтування вибору конфігурації до побудови 3D-моделі та розробки системи керування.

У першому розділі досліджено теоретичні основи побудови та моделювання маніпуляторів. Проведено аналіз існуючих типів конструкцій, наведено класифікацію робототехнічних маніпуляторів за функціональними й конструктивними ознаками, а також розглянуто сучасні підходи до їх моделювання. Результатом стало обґрунтування вибору оптимальної схеми та системи керування для заданих умов експлуатації.

У другому розділі було сформульовано вимоги до маніпулятора з урахуванням функціонального призначення та умов експлуатації. Проведено структурно-кінематичний синтез, реалізовано розв'язання прямої та оберненої задач кінематики в середовищі Mathcad, що дозволило обчислити координати ланок маніпулятора залежно від заданих кутів. Обґрунтовано вибір серводвигунів з урахуванням динамічних навантажень, габаритних обмежень та енергетичних характеристик.

У третьому розділі спроектовано основні конструктивні елементи маніпулятора, включаючи базу, виконавчі ланки та механічний захват. Визначено допустимі діапазони кутових переміщень для кожної ланки. Проведено аналіз робочої зони шляхом моделювання траєкторії руху маніпулятора та обчислено вантажопідйомність, яка обмежена моментом на першому приводі. Також розроблено систему керування на базі Arduino Uno, яка забезпечує прийом команд через COM-порт та управління сервоприводами в реальному часі.

У результаті виконано проектування маніпулятора, який відповідає вимогам до компактності, функціональності та автоматизованої роботи.

					БР.ПМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблена конструкція може бути використана в складі роботизованих технологічних систем, зокрема для завантаження або позиціонування деталей у виробничих осередках. Отримані результати створюють передумови для подальшого вдосконалення маніпулятора та впровадження його в реальні виробничі процеси.

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Список використаної літератури

1. Кальцев В. Є., Бодров І. М. Робототехнічні комплекси. – Київ: Ліра-К, 2019. – 296 с.
2. Гаврилюк В. М., Костюк В. І. Основи робототехніки: навч. посіб. – Львів: Видавництво ЛНУ ім. Івана Франка, 2020. – 228 с.
3. Чеканін С. О., Король А. І. Механіка маніпуляційних роботів. – К.: КНУТД, 2018. – 184 с.
4. Мазоренко О. О., Волков М. М. Теорія автоматичного керування. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – 240 с.
5. Craig J. J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. – 4th ed. – Boston: Pearson, 2018. – 504 p.
6. Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. *Robot Modeling and Control*. – 2nd ed. – Wiley, 2020. – 608 p.
7. Sciavicco L., Siciliano B. *Modelling and Control of Robot Manipulators*. – 2nd ed. – Springer, 2012. – 388 p.
8. Groover M. P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. – 5th ed. – Pearson, 2020. – 800 p.
9. Corke P. *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*. – 2nd ed. – Springer, 2017. – 570 p.
10. Arduino Uno R3 – Official Documentation. – [Електронний ресурс].
11. Mathcad Prime 8.0 – User Guide. – PTC Inc. – [Електронний ресурс].
12. DF15RMG, SR430, RDS3115 Servo Motors – Technical Specifications and Datasheets. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
13. González-de-Santos P. et al. *Robot Manipulators: Trends and Development*. – InTech, 2010. – [Електронний ресурс].
14. ISO 10218-1:2021. Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots.

					БР.ПІМІ - 064.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатки

Програмний код для Arduino, що реалізує керування сервоприводами маніпулятора

```
#include "Servo.h"
Servo servo0;
Servo servo1;
Servo servo2;
Servo servo3;
String s="";
int i;
int q0,nq0 = 94;
int q1,nq1 = 144;
int q2,nq2 = 180;
int q3,nq3 = 50;
float p0,p1,p2,p3;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  servo0.attach(6);
  servo1.attach(8);
  servo2.attach(10);
  servo3.attach(12);
  q0 = nq0;
  q1 = nq1;
  q2 = nq2;
  q3 = nq3;
  servo0.write(q0);
  servo1.write(q1);
  servo2.write(q2);
  servo3.write(q3);
  p0=q0;
  p1=q1;
  p2=q2;
  p3=q3;
}

void loop()
{
  while
  (Serial.available())
  char c = Serial.read();
  s += c;
  if (c == '!')
  {
    while (s[i] != ' ')
    {
      q0=q0*10;
      q0=q0+(int(s[i])-
48);
      i++;
    }
    i++;
    while (s[i] != ' ')
    {
      q1=q1*10;
      q1=q1+(int(s[i])-
48);
      i++;
    }
    i++;
    while (s[i] != ' ')
    {
      q2=q2*10;
      q2=q2+(int(s[i])-
48);
      i++;
    }
    i++;
    while (s[i] != '!')
    {
      q3=q3*10;
      q3=q3+(int(s[i])-
48);
      i++;
    }
    p0=p0+0.01;
    servo0.write(p0);
  }
  if (p0>q0)
  {
    p0=p0-0.01;
    servo0.write(p0);
  }
  if (p1<q1)
  {
    p1=p1+0.01;
    servo1.write(p1);
  }
  if (p1>q1)
  {
    p1=p1-0.01;
    servo1.write(p1);
  }
  if (p2<q2)
  {
    p2=p2+0.01;
    servo2.write(p2);
  }
  if (p2>q2)
  {
    p2=p2-0.01;
    servo2.write(p2);
  }
  if (p3<q3)
  {
    p3=p3+0.01;
    servo3.write(p3);
  }
  if (p3>q3)
  {
    p3=p3-0.01;
    servo3.write(p3);
  }
  delay(0.01);
}
```

Тема: «Проектування маніпулятора з механічним захватом для автоматизованої подачі заготовок»

Мета роботи: розробити конструкцію маніпулятора з механічним захватом для автоматизованої подачі заготовок, що забезпечує точність, жорсткість, надійність та простоту виготовлення в умовах серійного виробництва.

Об'єкт дослідження – маніпулятор з механічним захватом, призначений для переміщення заготовок у виробничих умовах.

Предмет дослідження – конструкція маніпулятора та його окремих вузлів, зокрема механічного захвату, кінематичної схеми та несучих елементів.

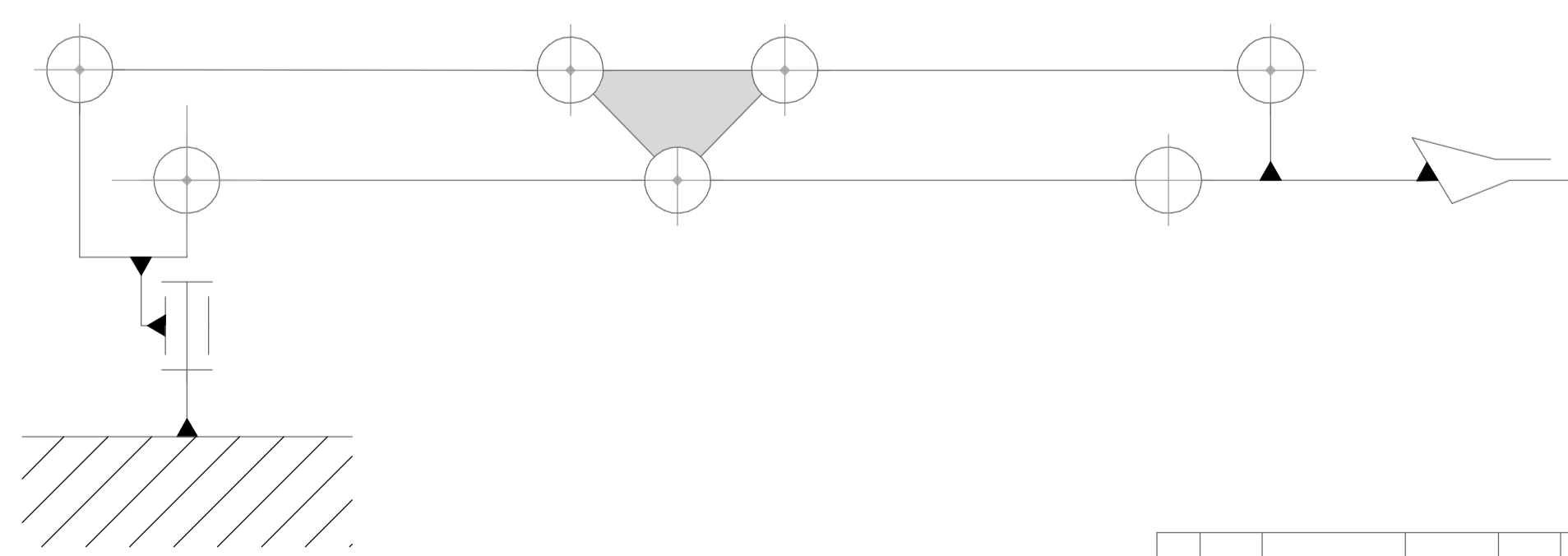
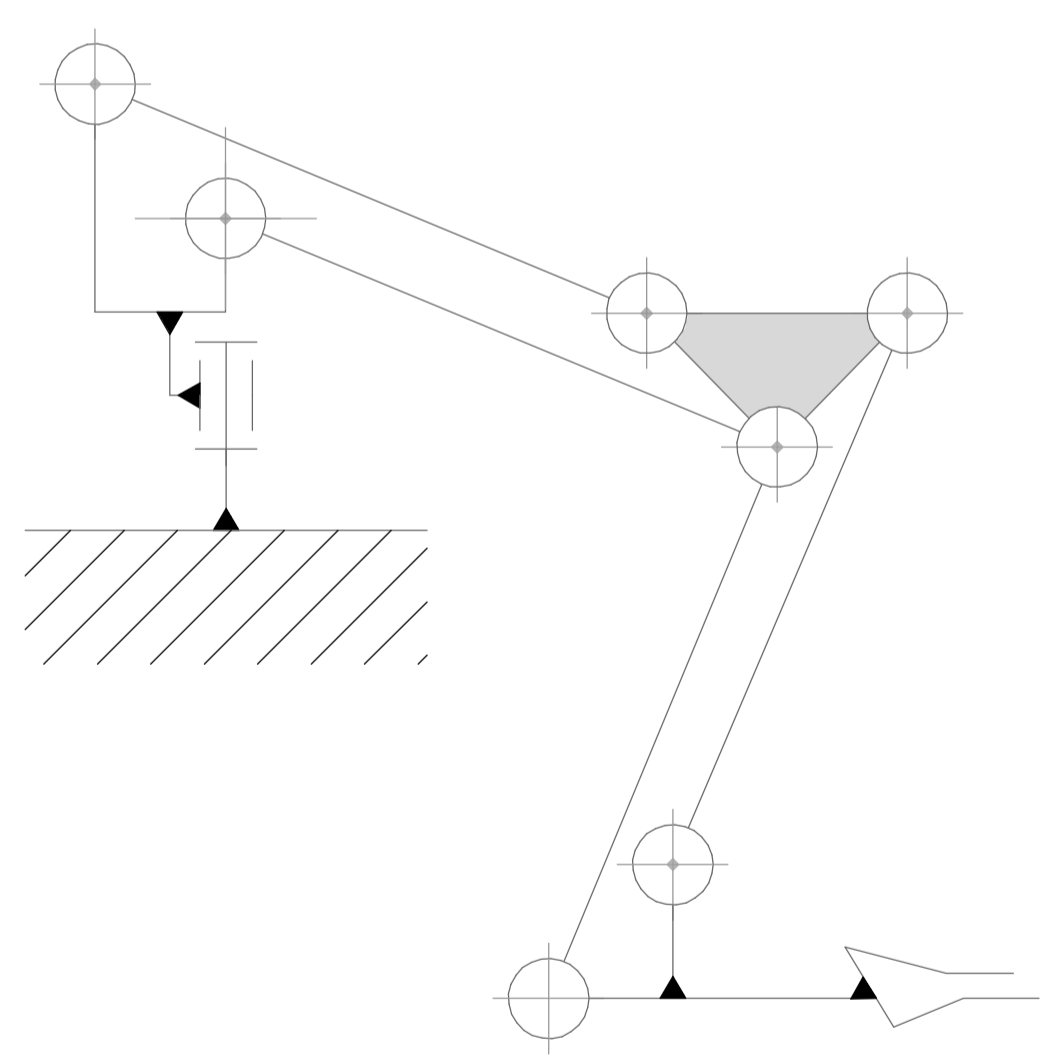
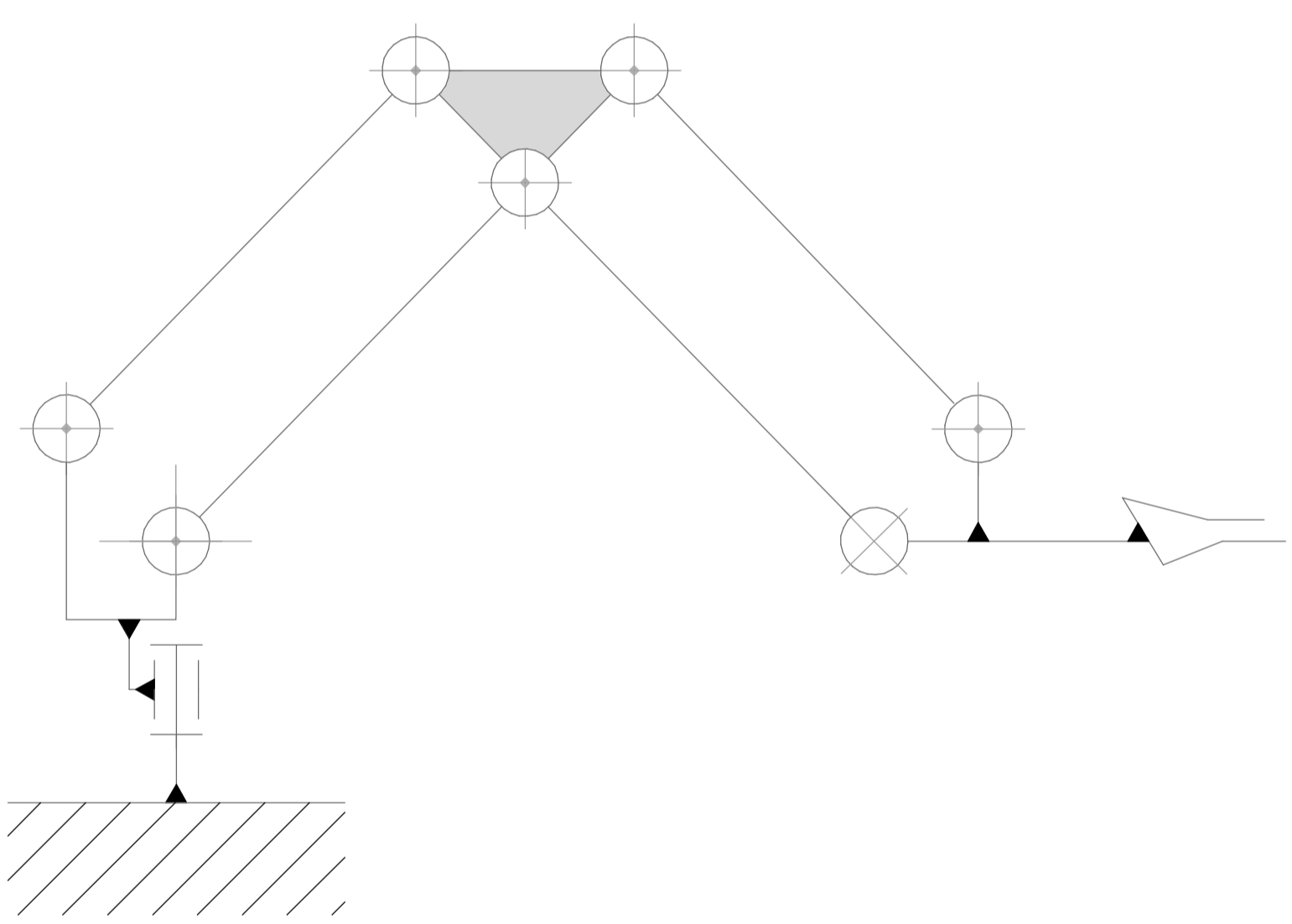
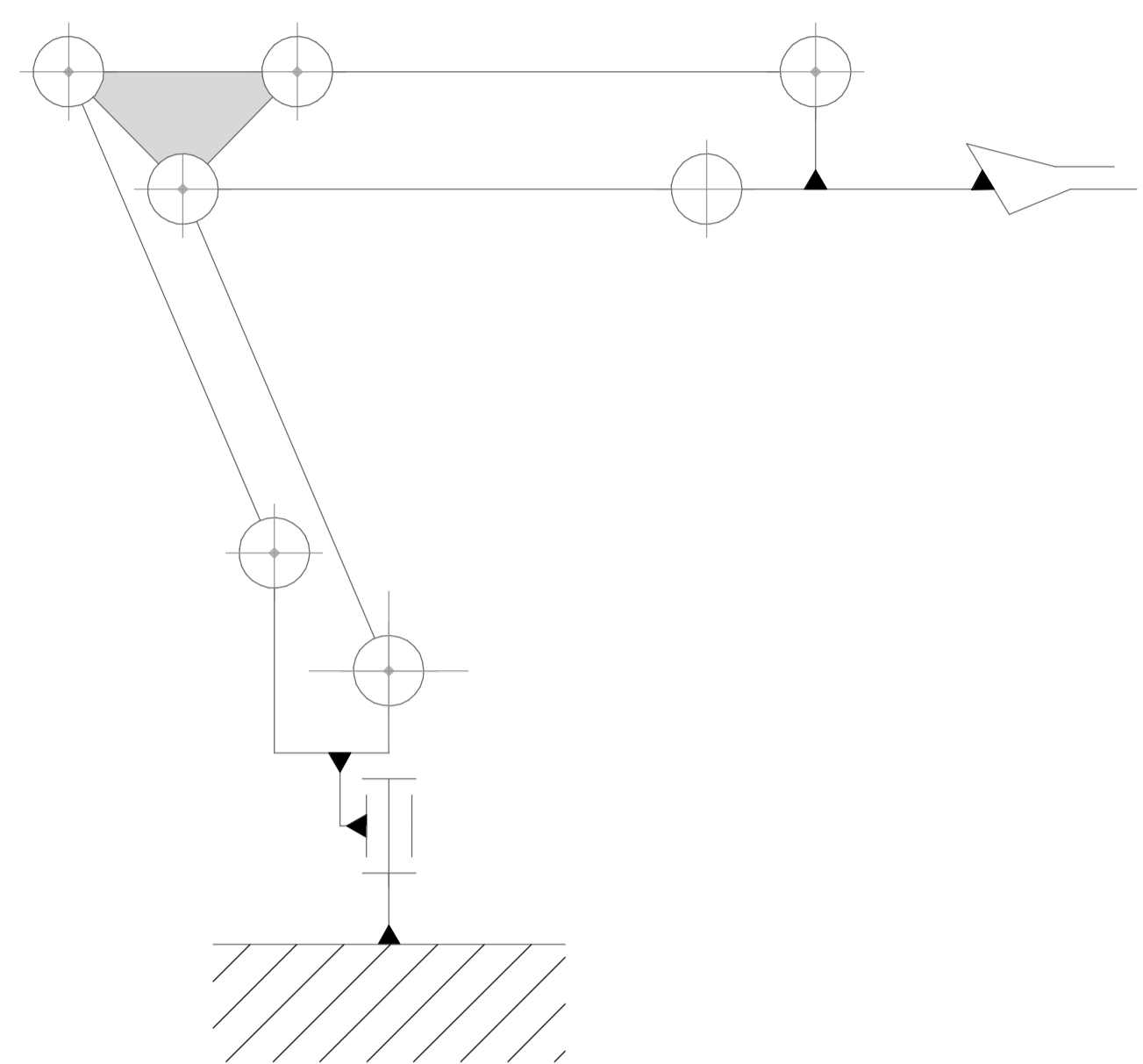
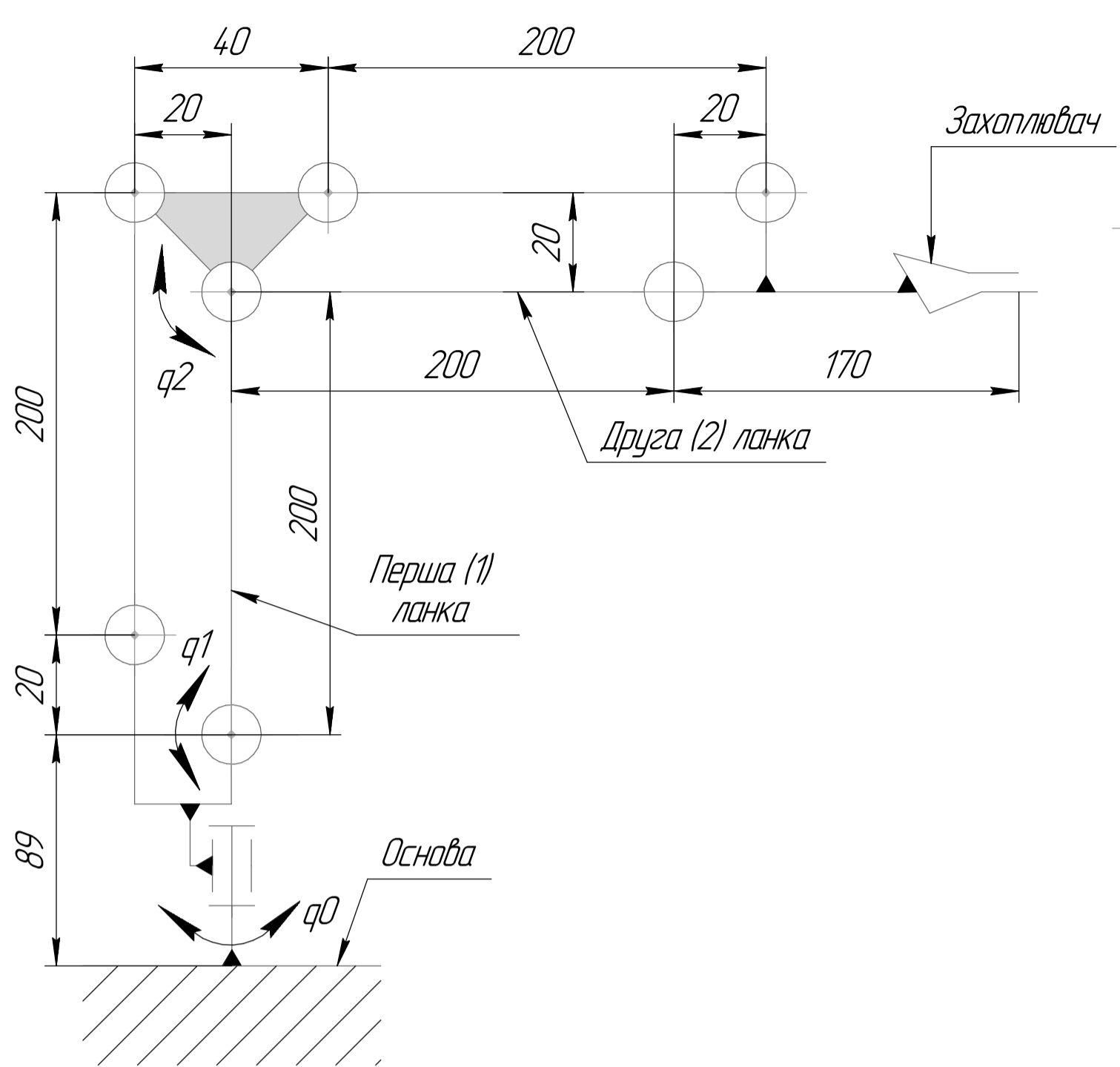
Актуальність : У сучасному машинобудуванні та суміжних галузях дедалі більше уваги приділяється автоматизації допоміжних операцій, зокрема подачі заготовок до оброблювальних установок. Це зумовлено потребою у зменшенні простотів обладнання, зниженні людського впливу на точність, підвищенні безпеки та повторюваності виробничих процесів.

Одним із ефективних технічних рішень для таких завдань є роботизовані маніпулятори з механічним захватом, які забезпечують надійне утримання, переміщення і точне позиціонування об'єктів у просторі. Актуальність теми визначається тим, що більшість доступних на ринку рішень є дорогими, громіздкими або потребують складної інтеграції, що обмежує їх використання у малому та середньому бізнесі.

Проблематика полягає в необхідності створення конструктивно простого, надійного та адаптивного маніпулятора, який би задовольняв основні функціональні вимоги при обмеженому бюджеті та враховував особливості конкретного виробничого середовища. Водночас, недостатня стандартизація компонентів, потреба в гнучкості, оптимізація розмірів і навантажень ускладнюють процес проектування.

Таким чином, дана бакалаврська робота спрямована на розробку конструкції маніпулятора з механічним захватом, який зможе ефективно працювати в умовах автоматизованої подачі заготовок, забезпечуючи технічну доцільність, економічну ефективність і практичну реалізованість.

				БР.ПМІ-064.00.000			
Эм.	Арж.	№ док.	Підп.	Дата	Лист	Масо	Масштаб
Разр.	Машків МІ					-	1:1
Лерев	Костюк Н.О.						
Т.контр.	Костюк Н.О.				Аржув	Аржув	1
Реценз.					ІФНТЧНГ		
Н.контр.	Костюк Н.О.				зр. ПМІ-21-1		
Затв.	Панчук В.Г.						



				БР.ПМІ-064.00.000			
Эк. Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Кінематика маніпулятора	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.	Мацьків М.І.					-	1:1
Перев.	Костюк Н.О.				Аркуш	Аркушів	1
Т.контр.	Костюк Н.О.				ІФНТУНГ		
Н.контр.	Костюк Н.О.				зр. ПМІ-21-1		
Затв.	Панчук В.Г.			-			

Аналіз кінематики маніпулятора в середовищі Mathcad

Розглядаємо пряму та зворотню кінематику маніпулятора. Пряма кінематика полягає у визначенні положення всіх ланок і робочої точки маніпулятора за відомими геометричними параметрами конструкції та кутами повороту шарнірних з'єднань. Натомість зворотня передбачає обчислення необхідних кутів повороту ланок для досягнення заданого положення робочого органа у просторі.

Реалізація в Mathcad

Пряма

Зворотня

Пряма кінематична задача
Початково задаються кути повороту у радіанах:
 $q_0 = 65 \frac{\pi}{180}$ $q_1 = 15 \frac{\pi}{180}$ $q_2 = 35 \frac{\pi}{180}$ $q_3 = -(q_1 + q_2)$
Геометричні параметри маніпулятора, мм
 $L_0 = 90$ $L_1 = 200$ $L_2 = 200$ $L_3 = 170$

Матриця переносу:
 $A_{L0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $A_{L1} = \begin{pmatrix} \cos(q_1) & 0 & \sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & 0 & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $A_{L2} = \begin{pmatrix} \cos(q_2) & 0 & \sin(q_2) & 0 \\ \sin(q_2) & 0 & \cos(q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $A_{L3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Матриця обертання:
 $A_{q0} = \begin{pmatrix} \cos(q_0) & -\sin(q_0) & 0 & 0 \\ \sin(q_0) & \cos(q_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $A_{q1} = \begin{pmatrix} \cos(q_1) & 0 & \sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & 0 & \cos(q_1) & 0 \\ -\sin(q_1) & 0 & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
 $A_{q2} = \begin{pmatrix} \cos(q_2) & 0 & \sin(q_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(q_2) & 0 & \cos(q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $A_{q3} = \begin{pmatrix} \cos(q_3) & 0 & \sin(q_3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(q_3) & 0 & \cos(q_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Розраховуємо матрицю положення точок:
 $A_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
 $A_1 = A_0 \cdot A_{q0} \cdot A_{L0}$
 $A_2 = A_1 \cdot A_{q1} \cdot A_{L1}$
 $A_3 = A_2 \cdot A_{q2} \cdot A_{L2}$
 $A_4 = A_3 \cdot A_{q3} \cdot A_{L3}$

Зворотня кінематична задача
Попередньо задаються ті ж самі довжини ланок:
 $L_0 = 90$ $L_1 = 200$ $L_2 = 200$ $L_3 = 170$
Відомими є координати точки захвата:
 $x = A_{4,0,3} = 148.052$
 $y = A_{4,1,3} = 317.499$
 $z = A_{4,2,3} = 129.976$
Після цього виконується послідовний аналіз:
1. Визначаємо проекцію точки P4 (кінцевої точки маніпулятора) на площину OXY
 $\Delta = \sqrt{x^2 + y^2}$
2. Розраховується проекція точки P3 (передостанньої ланки маніпулятора) також на площину
3. Зміщуємо вниз координату z точки P3 на площину XY:
 $z_1 = z - L_0$
4. Знаходимо відстань між початком координат і точки P3
 $B = \sqrt{x_1^2 + z_1^2}$
5. Знаходимо кут q_0
 $q_0 = \arcsin\left(\frac{z_1}{B}\right) = 1.134$
Після і друге ланки разом із відрізком B утворюють трикутник. Оскільки довжини всіх його сторін відомі, можна розрахувати внутрішні кути цього трикутника за допомогою тригонометричних формул. Знаходимо кут q_01
 $q_01 = \arccos\left(\frac{L_1^2 + B^2 - L_2^2}{2 \cdot B \cdot L_1}\right) = 1.091$
Визначаємо кут q_0r
 $q_0r = \arccos\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - B^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}\right) = 0.96$

Координати точок маніпулятора

$A_{0,3}$	$A_{1,3}$	$A_{2,3}$
$A_{1,0,3}$	$A_{1,1,3}$	$A_{1,2,3}$
$A_{2,0,3}$	$A_{2,1,3}$	$A_{2,2,3}$
$A_{3,0,3}$	$A_{3,1,3}$	$A_{3,2,3}$
$A_{4,0,3}$	$A_{4,1,3}$	$A_{4,2,3}$

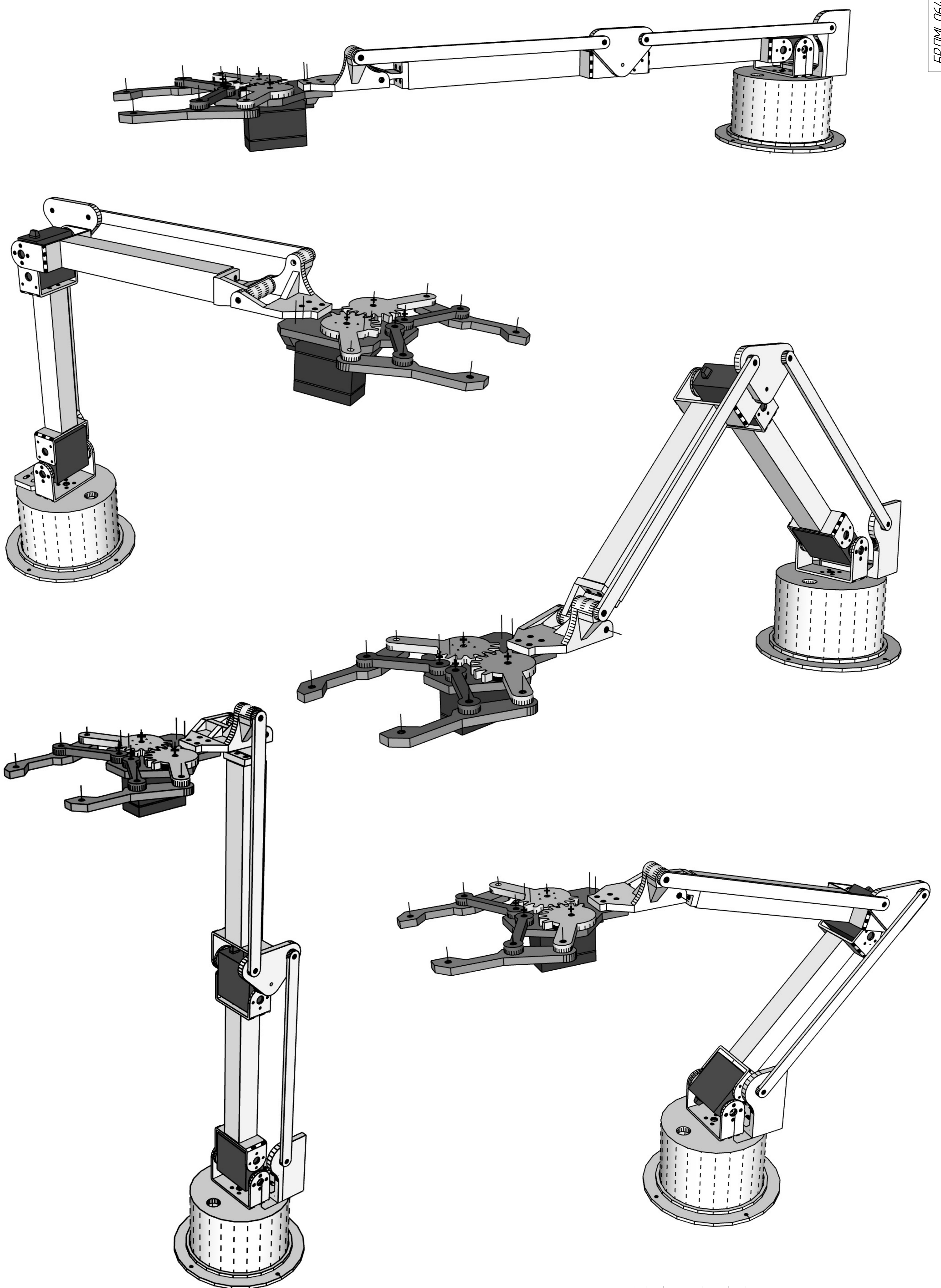
(X, Y, Z)

Знаходимо кут q_{02}
 $q_{02} = \arcsin\left(\frac{z_1}{B}\right) = 0.218$
Знайшовши кути трикутника можна визначити кути поворотів ланок
 $Q_1 = \frac{\pi}{2} - q_{01} - q_{02}$
 $Q_2 = \frac{\pi}{2} - q_{0r}$
Визначаємо кути в градусах
 $q_0 = Q_0 = 65$
 $q_1 = Q_1 = 15$
 $q_2 = Q_2 = 35$

Проведені розрахунки прямої та зворотної кінематики в середовищі Mathcad дозволили:

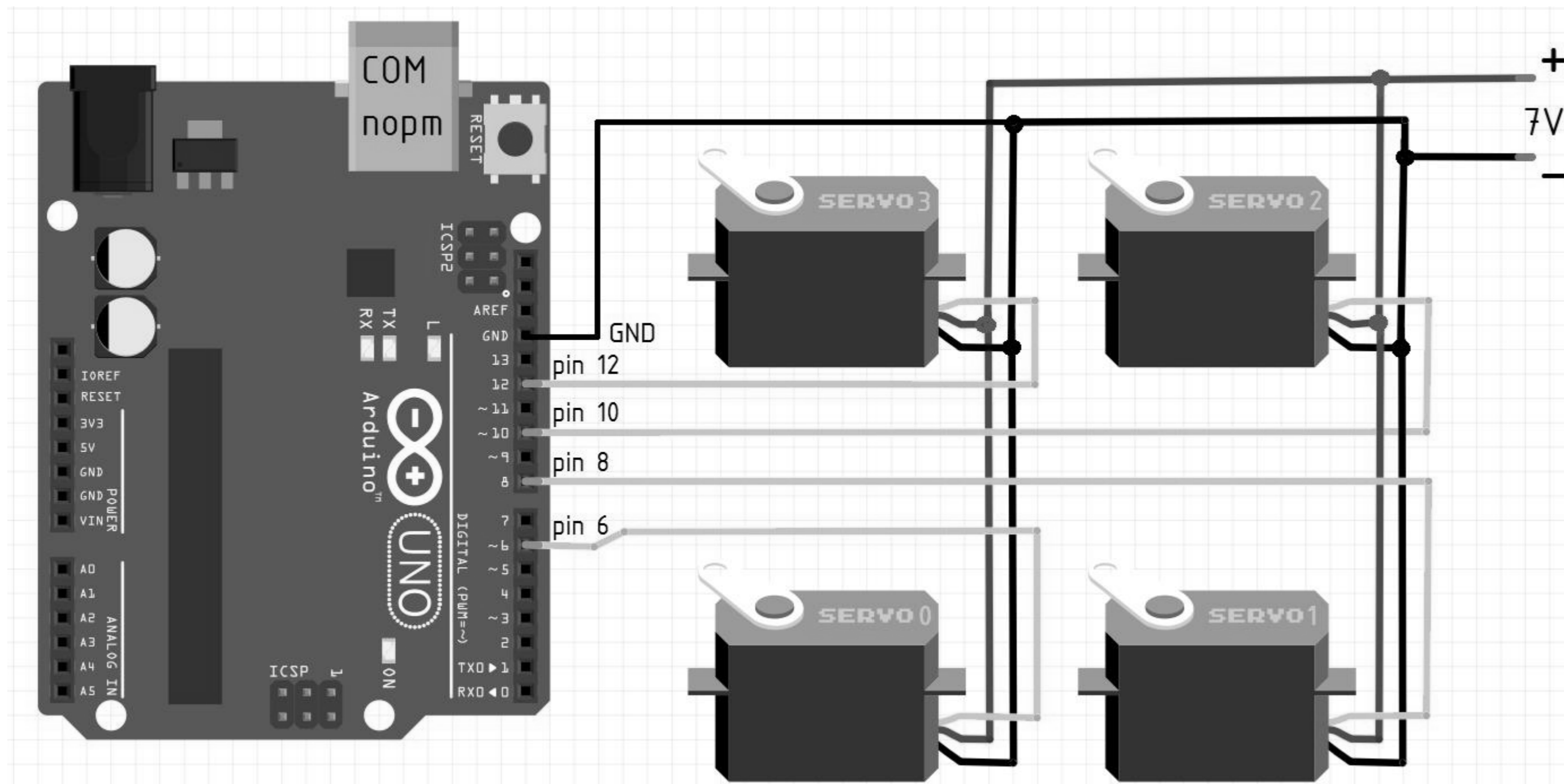
- знайти координати захвата маніпулятора при заданих кутах повороту ланок;
- визначити, на які кути потрібно повернути кожну ланку, щоб захват опинився в потрібній точці простору;
- побудувати траєкторію руху кінцевої точки маніпулятора;
- перевірити, чи зможе маніпулятор досягти заданих точок без порушення геометричних обмежень конструкції.

				БР.ПМІ-064.00.0000		
Эк. Арк.	№ док.	Підп.	Дата	Аналіз кінематики маніпулятора в Mathcad	Лист	Масштаб
Розроб.	Мацьків МІ				-	1:1
Лерев	Костюк Н.О.				Архив	Архив
Т.контр.	Костюк Н.О.					1
Реценз.	Костюк Н.О.				ІФНТУНГ	
Затв.	Панчук В.Т.			зр. ПМІ-21-1		



				БР.ПМІ-064.00.000			
Эк.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Лист	Маса	Масштаб
Розроб.		Машків МІ				-	1:1
Лерев		Костюк Н.О.					
Т.контр.		Костюк Н.О.			Аркуш		Аркушів 1
Реценз.		Костюк Н.О.			ФНТУНГ		
Н.контр.		Костюк Н.О.			зр. ПМІ-21-1		
Затв.		Панчук В.Г.					

Система керування маніпулятором реалізована на базі мікроконтролера Arduino Uno, який підключається до персонального компютера через COM-порт.



Електрична схема підключення сервоприводів до контролера Arduino Uno



Блок-схема роботи мікроконтролера Arduino

Для реалізації керування маніпулятором було розроблено програму на платформі Arduino. Вона дозволяє приймати з компютера через COM-порт кутові значення, які потім передаються на серводвигуни, що відповідають за обертання кожного з вузлів конструкції: основи, першого і другого звена, а також механічного захвата.

Програмний код для Arduino, що реалізує керування сервоприводами маніпулятора

```
#include "Servo.h"
Servo servo0;
Servo servo1;
Servo servo2;
Servo servo3;
String s="";
int i;
int q0,nq0 = 94;
int q1,nq1 = 144;
int q2,nq2 = 180;
int q3,nq3 = 50;
float p0,p1,p2,p3;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  servo0.attach(6);
  servo1.attach(8);
  servo2.attach(10);
  servo3.attach(12);
  q0 = nq0;
  q1 = nq1;
  q2 = nq2;
  q3 = nq3;
  servo0.write(q0);
  servo1.write(q1);
  servo2.write(q2);
  servo3.write(q3);
  p0=q0;
  p1=q1;
  p2=q2;
  p3=q3;
}

void loop()
{
  while (Serial.available())
  char c = Serial.read();
  s += c;
  if (c == '!')
  {
    i=0;
    q0=0;
    q1=0;
    q2=0;
    q3=0;
    while (s[i] != ' ')
    {
      q0=q0*10;
      q0=q0+(int(s[i])-48);
      i++;
    }
    i++;
    while (s[i] != ' ')
    {
      q1=q1*10;
      q1=q1+(int(s[i])-48);
      i++;
    }
    i++;
    while (s[i] != ' ')
    {
      q2=q2*10;
      q2=q2+(int(s[i])-48);
      i++;
    }
    i++;
    while (s[i] != ' ')
    {
      q3=q3*10;
      q3=q3+(int(s[i])-48);
      i++;
    }
    p0=p0-0.01;
    servo0.write(p0);
    if (p0<q0)
    {
      p0=p0+0.01;
      servo0.write(p0);
    }
    if (p0>q0)
    {
      p0=p0-0.01;
      servo0.write(p0);
    }
    p1=p1-0.01;
    servo1.write(p1);
    if (p1<q1)
    {
      p1=p1+0.01;
      servo1.write(p1);
    }
    if (p1>q1)
    {
      p1=p1-0.01;
      servo1.write(p1);
    }
    p2=p2-0.01;
    servo2.write(p2);
    if (p2<q2)
    {
      p2=p2+0.01;
      servo2.write(p2);
    }
    if (p2>q2)
    {
      p2=p2-0.01;
      servo2.write(p2);
    }
    p3=p3-0.01;
    servo3.write(p3);
    if (p3<q3)
    {
      p3=p3+0.01;
      servo3.write(p3);
    }
    if (p3>q3)
    {
      p3=p3-0.01;
      servo3.write(p3);
    }
    delay(0.01);
  }
}
```

Цей алгоритм дозволяє точно позиціонувати елементи маніпулятора відповідно до координат, які задаються оператором або автоматизованою системою керування.

				БР.ПМІ-064.00.000			
Эк. Арк.	№ док.м.	Підп.	Дата	Система керування маніпулятором	Лит.	Маса	Масштаб
Розроб.	Машків МІ					-	1:1
Лерев	Костюк Н.О.						
Т.контр.	Костюк Н.О.						
Реценз.	Костюк Н.О.						
Н.контр.	Костюк Н.О.						
Затв.	Панчук В.Г.						
					Архив	Архив	1
					ІФНТУНГ зр. ПМІ-21-1		