

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка конструкції промислового робота  
з використанням адитивних технологій

Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Шифр БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
4 курсу групи РМ-20-1

  
Підпис

Д.С. Пінковський  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

С.І. Пундик  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

К.Т.Н., доц. Тимошук О.  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

21 06 2024 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і назва

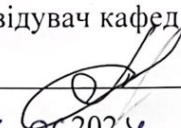
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Шифр і назва

Освітня програма Робототехнічні та мехатронні системи галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

  
21.06.2024

ЗАВДАННЯ  
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Пінковський Дмитро Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка конструкції промислового робота з використанням адитивних технологій

керівник роботи Пундик Сергій Іванович

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 15 02 2024 р. № 8

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 21.06.2024

3. Вихідні дані до роботи технічні характеристики промислових роботів

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

Вступ. 1. Огляд та аналіз конструкцій промислових роботів та маніпуляторів.

2. Проектування промислового робота. 3. Розрахунок механічних елементів приводу. Висновки. Перелік джерел посилань.

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

1. Моделі промислових роботів (ДО, А1). 2. Промисловий робот (ВЗ, А1).

3. Корпусна основа (А1). 4. Низ підшипника (А1). 5. Плече праве (А1)

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз конструкцій промислових роботів та маніпуляторів.	15.05.24р.	
2. Проектування промислового робота .	1.06.24р.	
3. Розрахунок механічних елементів приводу.	16.06.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу.	20.06.24р.	

Студент

Підпис

Д.С. Пінковський

Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

С.І. Пундик

Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента  
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Пінковський Дмитро Сергійович

2. Тема бакалаврської роботи Розробка конструкції промислового робота з використанням адитивних технологій

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента Долбровська О.М., доц. каф. ТКСВ

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 61

5. Розвиток робототехніки набирає обертів з кожним днем. Використання нових технологій дає можливість створювати роботизовані системи з широким функціоналом. Важливим напрямом у сучасному виробництві є використання промислових роботів-маніпуляторів, розробка і модернізація яких є актуальним завданням, оскільки існуючі пропозиції на ринку таких роботів здебільшого мають набір однакових функцій і високу вартість. У бакалаврській роботі розробляється промисловий робот-маніпулятор з використанням адитивних технологій. У розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. У першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень з тематики роботи, а саме огляд ринку готової продукції та її класифікації. У другому здійснюється розробка моделі робота-маніпулятора. У третьому розділі проведено розрахунки механічних елементів приводу маніпулятора.

Підпис студента 

"21" 06 2024 р.

### РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від "26" 06 2024 р.

Оцінка проекту ЕК відмінно А  
Рекомендації ЕК впровадження в навчальний процес

Особливі відмітки -






Технічний секретар Буряк І.В.

"26" 06 2024 р.

Зміст

Стор.

ВСТУП .....	6
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ ТА МАНІПУЛЯТОРІВ.....	7
1.1 Аналіз проблем автоматизації виробництв .....	7
1.2 Загальні відомості про промислові роботи, їх класифікація .....	10
1.3 Огляд основних типів сучасних промислових роботів .....	14
1.4 Огляд сучасних моделей шарнірних промислових роботів .....	19
Висновки до першого розділу.....	23
2 ПРОЕКТУВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА .....	24
2.1 Конструювання шестиосьового промислового робота .....	24
2.2 Електроприводи робота .....	33
2.3 Технічна архітектура робота .....	39
2.4 Управління промисловим роботом .....	43
Висновки до другого розділу .....	50
3 РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДУ .....	52
3.1 Розрахунок внутрішнього зачеплення .....	52
3.2 Перевірка міцності зубців на згин .....	55
3.3 Розміри вінців зубчастих коліс .....	57
3.4 Зусилля у зачепленні зубців передачі .....	58
Висновки до третього розділу.....	58
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	60
ДОДАТКИ	

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ доким.	Підпис	Дата				
Розроб.		Лінковський Д.С.			Розробка конструкції промислового робота з використанням адитивних технологій.	Лит.	Арк.	Аркциф
Перевір.		Пандик С.І.					5	61
Реценз.		Госейрський В.В.				ХНУ. Гр. РМ-20-1		
Н. Кантр.		Тимошук						
Затверд.		Поліщук						

## ВСТУП

У сучасному світі робототехніка стає все більш визначальною у багатьох сферах людської діяльності, таких як промисловість, медицина, будівництво, дослідницька робота та побут. Це пов'язано із зростанням потреби у високотехнологічних "помічниках", які полегшують виконання завдань, підвищують якість роботи та зменшують ризик виробничих травм, включаючи летальні.

Однією з важливих категорій роботизованих пристроїв є роботизовані маніпулятори. Роботизований маніпулятор - це пристрій, що імітує рухи, аналогічні рухам людської руки. Він призначений для вирішення різноманітних завдань, від простого переміщення об'єктів у просторі до виконання складних хірургічних операцій. З існуванням безлічі видів маніпуляторів, кожен з яких має свої унікальні характеристики та можливості, виникає можливість вибору оптимального рішення відповідно до поставленої задачі.

Мета даної бакалаврської роботи полягає в дослідженні класифікацій та принципів роботи промислових роботів з метою створення власної моделі промислового робота, який може використовуватись як експериментальна модель. Це дозволить вивчити та застосувати алгоритми керування, що в свою чергу сприятиме можливості управління більш складним та потужним пристроєм.

Практичне значення цієї роботи полягає в тому, що об'єкт дослідження може використовуватися в середовищі, небезпечному для людей, на виробництві з метою зменшення вартості продукції, а також як лабораторний стенд у вигляді візуальної моделі під час, та для навчання студентів і школярів.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
						6
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ ТА МАНІПУЛЯТОРІВ

## 1.1 Аналіз проблем автоматизації виробництв

В сучасних виробничих умовах важливо досягти ефективної автоматизації, особливо в галузях, де традиційно велика кількість операцій виконується вручну. Промислові процеси часто включають значну ручну працю та вимагають контролю з боку операторів. Це не лише може призводити до великої трудомісткості, але й створює ризики для здоров'я працівників через шум, використання небезпечних матеріалів та несприятливі умови праці.

З моменту, коли виробництво стає більш гнучким і відзначається невеликими серіями та швидкими змінами у вимогах ринку, ефективна автоматизація стає критично важливою. У сучасну епоху, коли популярність виробів часто змінюється, підприємства повинні бути здатні адаптуватися до нових уподобань споживачів. Такі потреби вимагають від виробників впровадження та реалізації гнучких виробничих ліній та швидкого перепрофілювання.

З метою оптимізації процесів та поліпшення умов праці, науково-дослідні роботи в області автоматизації промислового виробництва є актуальним завданням. Оцінка існуючих сучасних конструкцій механізмів та машин, вивчення науково-технічної інформації, що включає в себе патенти, винаходи та наукові публікації, є необхідним для розробки нових рішень в галузі автоматизації виробництва. У виробничих процесах всі об'єкти, що переміщуються транспортними пристроями, поділяються на дві основні категорії: насипні та штучні. Штучні вантажі, в свою чергу, поділяються на такі типи: одиничні (власне штучні), запаковані, тарні та контейнерні. Для оптимізації обробки цих вантажів та забезпечення їхнього безперервного руху створюються транспортні системи, що включають в себе різні види транспортувальних машин.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливо також враховувати передачу об'єктів транспортування конкретного виробництва з одного транспортного засобу на інший та з однієї технологічної лінії на іншу. Враховуючи конструктивні, геометричні, технологічні та кінематичні параметри об'єктів, також важливо вибрати відповідний тип перевантажувального пристрою для оптимізації роботи транспортної системи.

Таким чином, взаємодія транспортних засобів створює необхідність у забезпеченні їхнього зв'язку. Традиційно цей зв'язок забезпечується людиною: процеси завантаження та розвантаження транспортних засобів, а також переміщення вантажів з одного конвеєра на інший здійснюються вручну, що призводить до тяжкої, монотонної та стомлюючої праці для працівників. Однак впровадження автоматизації може спростити цей процес та зробити його більш ефективним для забезпечення якості та безпеки виробництва.

Для оптимізації цих процесів та підвищення ефективності виробництва важливо розглянути використання робототехнічних пристроїв, які можуть поєднати окремі технологічні конвеєрні та виробничі лінії в єдину систему. Це дозволить досягти таких важливих цілей як:

- забезпечення гнучкості та компактності виробництва;
- підвищення ефективності управління виробництвом;
- підвищення продуктивності виробничого процесу;
- забезпечення технологічності та надійності виробництва;
- забезпечення високої якості виробів;
- ліквідація важкої та монотонної праці;
- підвищення економічної ефективності виробництва.

Пристрій, який здійснює допоміжні операції, аналогічні функціям людської руки при переміщенні предметів у просторі, називається маніпулятором [1]. В порівнянні з людською працею, їхня продуктивність набагато більша завдяки швидкості переміщення і позиціонування робочого інструменту, а також можливості працювати цілодобово, що не можливо для людини.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використовуючи маніпулятори як перевантажувальні пристрої, можна автоматизувати процес передачі об'єктів транспортування, створюючи при цьому безперервний транспортний ланцюг.

Для досягнення цієї мети маніпулятори мають бути оснащені перепрограмованим пристроєм управління. Це дозволяє перетворити маніпулятор на промислового робота, що дає можливість змінювати програму управління та оптимізувати роботу транспортних систем і обладнання.

Таким чином, використовуючи в якості перевантажувального пристрою промисловий робот, можливо вирішити встановлену раніше задачу – автоматизувати процес виконання різних технологічних операцій, та переміщення об'єктів транспортування виробництва з метою створення безперервного транспортного ланцюга, що в свою чергу сприяє значному підвищенню ефективності виробничих процесів.

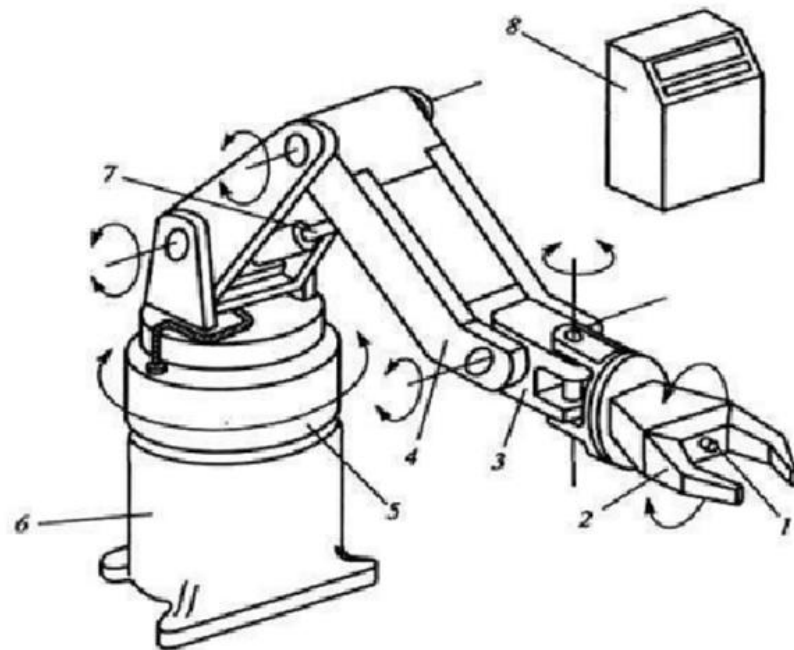
На сучасному виробництві все частіше використовуються промислові роботи, що не тільки здатні забезпечувати переміщення та транспортування різних об'єктів, але і виконувати технологічні процеси, контрольні функції та обслуговування устаткування. Однією з ключових переваг промислових роботів є їхня гнучкість і здатність до швидкої адаптації. Завдяки можливості зміни виконавчих пристроїв та перепрограмуванню алгоритмів роботи, вони можуть ефективно пристосовуватися до різноманітних завдань без необхідності внесення значних змін у їхню конструкцію. В результаті промислові роботи можуть ефективно вирішувати безліч різноманітних завдань, інтегруючись у виробничі та логістичні системи для підвищення їх ефективності.

Також, їх перевагою є те, що на відміну від механізмів, що працюють в системі декартових координат, таких як, наприклад, 3D-принтери, маніпулятори здебільшого використовують полярну систему координат для переміщень і мають робочу область у формі дуги, що робить їх досить маневреними в обмеженому просторі. Враховуючи ці можливості, дані роботи знаходять застосування в різних галузях, таких як виробництво, медицину, дослідження та обслуговування.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
						9
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

## 1.2 Загальні відомості про промислові роботи, їх класифікація

Промисловий робот (ПР) — багатоцільовий маніпуляційний робот, що складається з механічного маніпулятора і перепрограмованої системи керування, який застосовується для переміщення об'єктів в просторі трьох і більше координат та для виконання різноманітних процесів у виробничому середовищі (рис. 1.1) [15].



1 - датчик зворотнього зв'язку; 2 - захватний пристрій; 3 - кисть маніпулятора; 4 - рука; 5 – поворотна основа маніпулятора; 6 - несуча конструкція; 7 - привід руки маніпулятора; 8 - блок управління з пультом

Рисунок 1.1 - Стандартна конструкція промислового робота

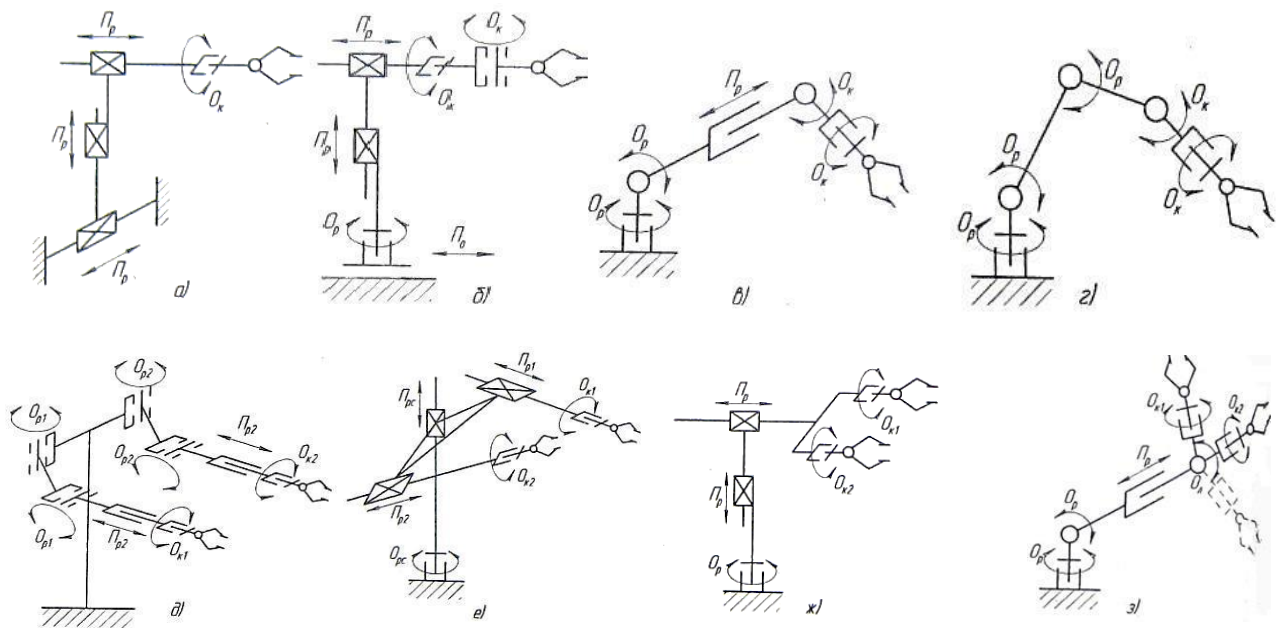
Ці маніпуляційні системи використовуються в різних галузях промисловості, забезпечуючи автоматизацію та оптимізацію виробничих процесів. Завдяки своїй гнучкості та точності, промислові роботи можуть виконувати широкий спектр завдань, від зборки та упаковки до обробки матеріалів та зварювання.

									Арк.
									10
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ				

Працездатність маніпуляторів визначається низкою технічних характеристик, таких як робоча зона, зона обслуговування, кількість ступенів свободи, вантажопідйомність, швидкість руху та енергетичні показники. Ці параметри визначають функціональні можливості та продуктивність маніпулятора для конкретних завдань.

Різні роботи, маючи відмінний технічний рівень, системи управління, інформаційне забезпечення та виконавчі органи, складають велику групу машин, призначених для виконання широкого спектру операцій. Їхньою спільною рисою є здатність до швидкого переналаштування для автоматичного виконання різних завдань, запрограмованих у системі управління.

За допомогою запропонованого структурного методу можна чітко уявити кінематичні схеми промислових роботів будь-якої складності, зручно їх аналізувати і вибрати більш обґрунтовано (рис. 1.2).



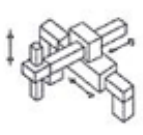
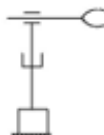
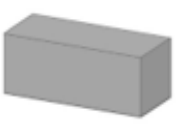

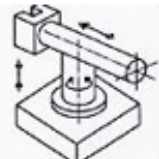
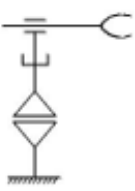






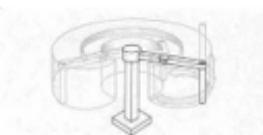
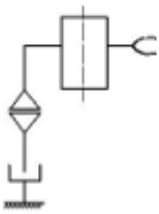



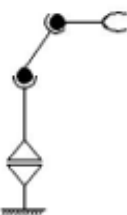


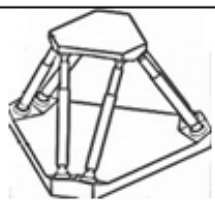
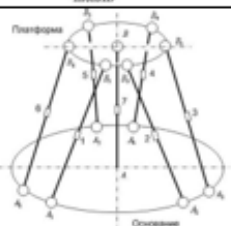


а - г – однорукі, одно захватні; д, е - дворукі одно захватні; ж - з – однорукі  
дво – захватні

Рисунок 1.2 - Типові кінематичні схеми ПР

									Адк.
									11
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата					

Класифікація ПР по механічній структурі та робочій зоні обслуговування (таблиця 1.1) [3]:

Таблиця 1.1 – Класифікація ПР

Робот Принцип дії і система координат	Вісь		Приклади Фото
	Кінематична структура	Робочий простір	
 Прямокутна			
 Циліндрична			
 Сферична			
 Горизонтально-плечова			
 Антропоморфний			
 Гексапод (паралельний)			

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Адк.

12

Більш узагальнена класифікація ПР з врахуванням ГОСТ 25685-83 наведена на рисунку 1.3 [3]:

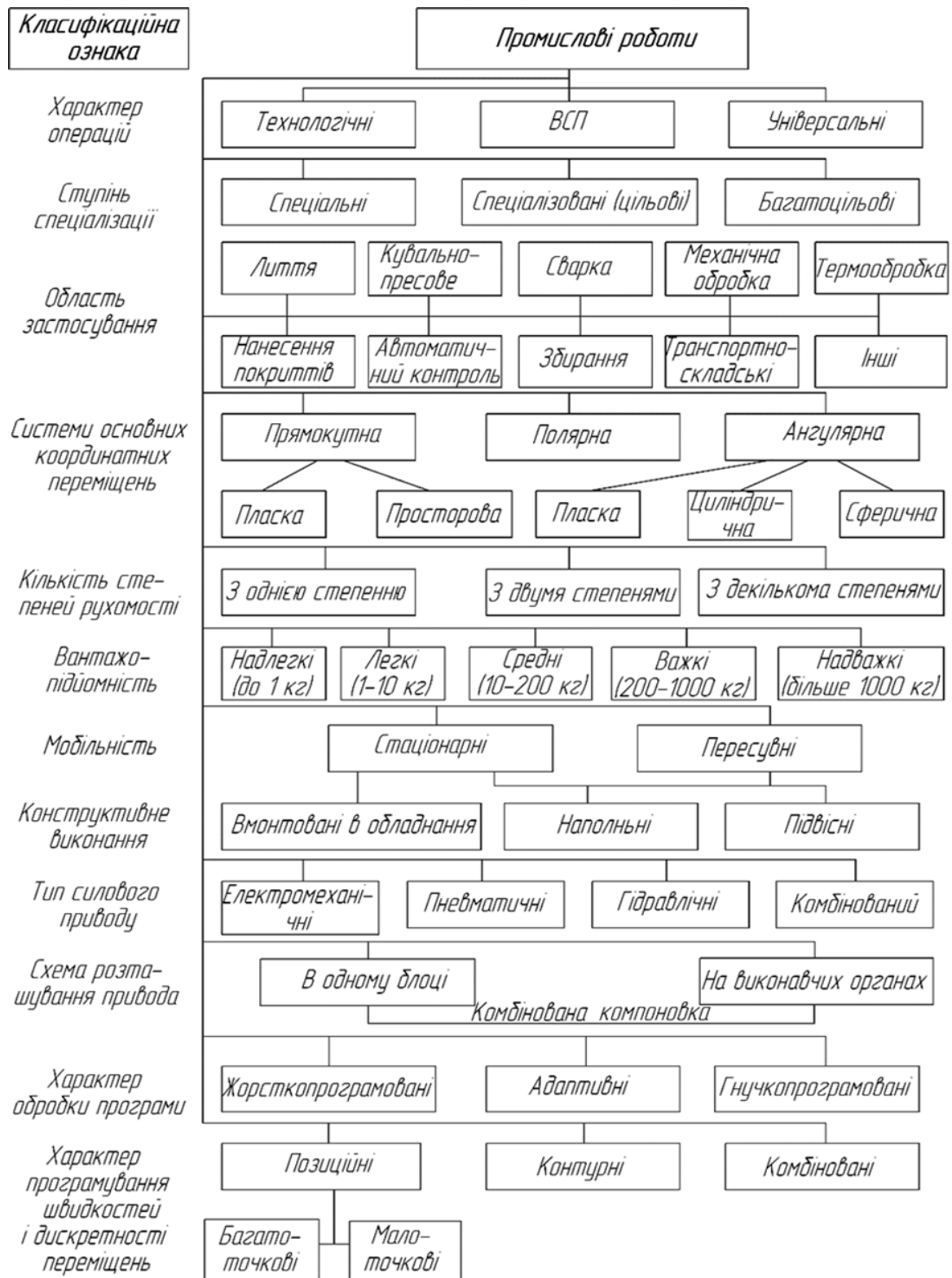


Рисунок 1.3 – Узагальнена класифікація ПР

Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

### 1.3 Огляд основних типів сучасних промислових роботів

З огляду на класифікацію, за конструктивними особливостями можна виділити такі типи промислових роботів, які мають свої особливості структури:

- зварювальні роботи;
- складальні роботи;
- роботи для використання на механобробці;
- ливарні роботи;
- ковальсько-пресові роботи;
- роботи для нанесення покриттів;
- транспортно-складські роботи;
- для термообробки;
- для автоматичного контролю;
- інші.

Спосіб установки на робочому місці:

- підлогові;
- підвісні;
- вбудовані в обладнання.

Роботи вбудованого типу призначені для обслуговування або виконання завдань на одному конкретному верстаті або обладнанні. Вони інтегруються безпосередньо в робочий процес певного обладнання чи машини, що дозволяє їм взаємодіяти з виробничими системами без значних переміщень та займаючи обмежений обсяг простору.

Підлогові промислові роботи (рис. 1.4) вважаються найбільш простими в категорії роботів через їхню обмежену конструкцію, що включає саму лиш маніпуляційну систему і засіб керування [4]. Зміна позиції робочого органу відбувається виключно за допомогою жорстко закріпленого на підлозі маніпулятора. Ці роботи підходять для виробничих середовищ, де важлива стабільність, точність і простота експлуатації.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		14

За потреби робот можна переміщувати за допомогою спеціальних засобів, що встановлюються на підлозі.



Рисунок 1.4 - Підлогові промислові роботи

Підвісні промислові роботи (рис. 1.5), як правило, функціонують в прямокутній системі координат, що передбачає виконання двох основних типів рухів – переміщення уздовж осей (осі) порталу та в напрямку перпендикулярному до осі порталу (рух руки по вертикалі або ж під певним кутом до неї) [4].

У циліндричній полярній системі координат ці роботи виконують три основні рухи: переміщення вздовж вертикальної осі порталу, обертання навколо горизонтальної осі і висування руки. Ці рухи також відбуваються у циліндричній кутовій системі координат, включаючи переміщення вздовж осі порталу та обертання кожної ланки маніпуляційної руки.

Підвісні промислові роботи мають різноманітні конструкції. Окрім основних рухів, визначаючих систему координат, вони здатні виконувати додаткові орієнтаційні рухи, такі як обертання кисті з захоплюючим пристосунком навколо осі руки та обертання кисті навколо однієї чи декількох осей, перпендикулярних до осі руки.

Крім того, застосовуються підвісні промислові роботи тельферного типу, які переміщуються по монорейкових або двохрейкових шляхах, закріплених до перекриття цеху або спеціальних стійок. Монорейкові шляхи можуть мати як пряму, так і овальну форму [4].

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		15



Рисунок 1.5 - Підвісні роботи

За ступенем спеціалізації промислові роботи поділяються на:

- спеціальні роботи, призначені для виконання певної технологічної операції або обслуговування конкретної моделі основного технологічного обладнання (рис. 1.6);
- спеціалізовані (цільові) роботи мають більш вузьке призначення та виконують одну певну операцію (наприклад, зварювання, фарбування, обслуговування обладнання певного виду);
- багатоцільові роботи, що здатні виконувати різноманітні основні та допоміжні операції.



а)



б)

а – робот для демонтажу; б – робот для зварювальних робіт

Рисунок 1.6 - Спеціальні промислові роботи

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Мобільні роботи (рис. 1.7) поділяються на транспортні, виробничі та спеціальні [4].

В свою чергу виробничі мобільні роботи поділяються на дві основні категорії: маніпуляційні мобільні роботи та технологічні мобільні роботи.

Виробничі мобільні роботи зазвичай оснащені маніпулятором з виконавчим пристроєм, який може бути як захоплюючим, так і спеціалізованим технологічним обладнанням, таким як зварювальні, різальні або фарбувальні пристрої. Ці роботи застосовуються в різних технологічних процесах, де необхідно переміщувати технологічне обладнання або об'єкти на значні відстані за різними траєкторіями.

Транспортні мобільні роботи використовуються для автоматизованого переміщення об'єктів і застосовуються в різних виробничих та логістичних транспортних системах. Їх основною перевагою є здатність оптимізувати логістичні процеси та підвищувати продуктивність завдяки точним системам навігації та управління.

Спеціалізовані мобільні роботи можуть застосовуватись для спостереження, контролю, збору інформації тощо.

Мобільні роботи можуть функціонувати повністю автономно або працювати в інтерактивному режимі спільно з оператором.

Транспортні роботи, що обслуговують склади є прикладом автономних роботів, які функціонують без необхідності постійного контролю людини.

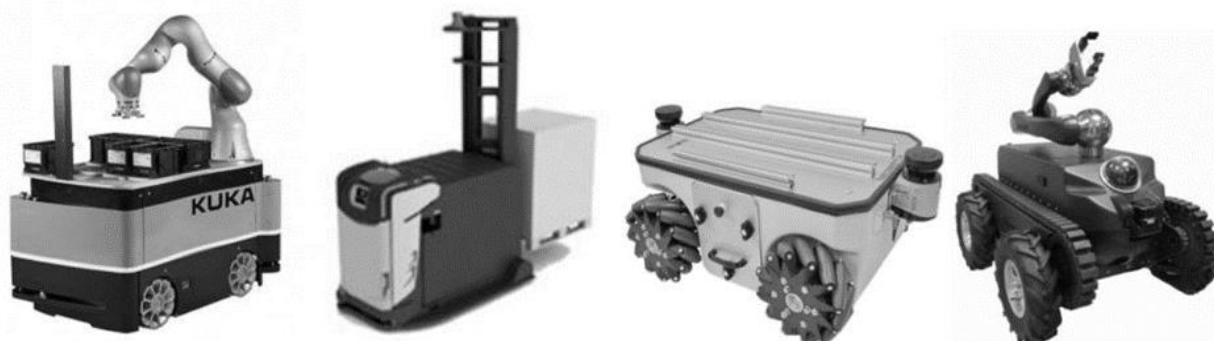


Рисунок 1.7 - Мобільні роботи

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Принцип агрегатно-модульного конструювання передбачає створення промислових роботів на базі уніфікованих вузлів або модулів [2]. Цей метод видається особливо привабливим завдяки ряду переваг:

- можливість створення спеціальних і спеціалізованих роботів для конкретних технологічних завдань, які не характеризуються надмірністю функцій і тому є більш економічними в порівнянні з універсальними роботами;
- умови експлуатації та обслуговування роботів покращуються за рахунок зменшення різноманітності конструкційних рішень.;
- час і трудомісткість проектування спеціальних роботів скорочуються, оскільки вони базуються на уніфікованих елементах, номенклатура яких легко може бути доповнена.
- надійність підвищується завдяки використанню уніфікованих вузлів і відсутності надмірності.
- витрати на виробництво роботів знижуються через обмежену номенклатуру деталей і вузлів, що сприяє підвищенню серійності випуску.
- час підготовки обслуговуючого персоналу скорочується.

Однак агрегатно-модульний принцип має певні обмеження та недоліки:

- у деяких випадках відмова від більш ефективних конструктивних рішень на користь менш ефективних, але відповідних принципу агрегатної побудови;
- збільшення масогабартних характеристик конструкції, що не завжди є доцільним у випадках, коли важлива компактність і легкість;
- збільшення кількості з'єднань, що підвищує складність збирання та обслуговування роботів, та призводить до зниження жорсткості і точності рухів.

Узагальнюючи, усі вищезазначені переваги та недоліки агрегатно-модульного підходу обумовлені самим вибором цього методу конструювання, і вимагають обережного розгляду та ретельного планування при розробці та експлуатації роботів. Підхід слід використовувати з обережністю, враховуючи його потенційні обмеження у підборі конструктивних рішень та можливих втрат у компактності та точності рухів.

										Адк.
										18
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ					

#### 1.4 Огляд сучасних моделей шарнірних промислових роботів

Шарнірні роботи - це роботи, які характеризуються гнучкою механічною конструкцією, основою на використанні шарнірів або аналогічних з'єднань, що нагадують суглоби. Ці роботи мають кілька обертових осей, зазвичай від трьох до шести, що забезпечує високу свободу руху та дозволяє маніпулятору досягати різних позицій і орієнтацій у просторі. Дана конструкція надає їм велику гнучкість і здатність виконувати різноманітні рухи і операції, схожі на ті, що виконуються людськими суглобами.

Переваги шарнірних роботів для використання на виробництві:

- гнучкість і маневреність. Шарнірні роботи оснащені обертовими зв'язками, які надають їм гнучкість і можливість виконувати різні рухи та операції. Це дозволяє їм легко адаптуватися до різних завдань виробництва;
- висока точність та повторюваність. Шарнірні роботи можуть забезпечити високу точність виконання завдань, таких як нарізка матеріалів, шиття або навіть нанесення декоративних елементів. Це дозволяє досягати стабільної якості виробів;
- можливість працювати у вузьких просторах. У виробництві часто потрібно працювати у вузьких та важкодоступних місцях. Шарнірні роботи здатні виконувати операції в обмежених умовах завдяки своїй гнучкості;
- можливість роботи з різними матеріалами. Вони можуть працювати з різними матеріалами, включаючи шкіру, текстиль, пластик та інші, що є важливим аспектом любого виробництва;
- простота програмування. Шарнірні роботи можуть бути легко програмовані для виконання конкретних завдань. Оснащені інтерфейсами з візуалізацією, які спрощують налаштування та керування.

На рисунках 1.8 - 1.11 представлені зразки моделей сучасних шарнірних промислових роботів від провідних виробників (FANUC, KAWASAKI, YASKAWA, KUKA ).

									Адк.
									19
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата					



а)

б)

а – модель LR Mate 200iD; б – модель LR Mate 200iD/7WP

Рисунок 1.8 - Промислові роботи фірми FANUC



а)

б)

а – модель RS020N; б – модель CX210L

Рисунок 1.9 - Промислові роботи фірми KAWASAKI

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

20



а)



б)

а – модель GP25; б – модель GP400

Рисунок 1.10 - Промислові роботи фірми YASKAWA



а)



б)

а – модель KR 6 R1840-2; б – модель KR 3 AGILUS R540

Рисунок 1.11 - Промислові роботи фірми KUKA

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

21

Промисловий робот KUKA KR 3 R540 відомий своєю економічністю, надійністю та високою швидкістю, що робить його одним із найшвидших у своєму класі. Цей робот є ідеальним вибором для проектів, які потребують мінімального часу виконання операцій при забезпеченні максимальної продуктивності. Він підходить для виробництва дрібних деталей, виконання операцій з захоплення та розміщення, паяння, склеювання, упаковки, тестування та інших завдань.

Основні технічні характеристики:

- максимальне навантаження робота: 3 кг;
- кількість осей: 6;
- максимальна горизонтальна досяжність: 541 мм;
- повторюваність:  $\pm 0,02$  мм;
- контролер: KR C4 compact.

Інформація про робочий простір та габаритні розміри промислового робота KUKA KR 3 R540 представлена на рисунку 1.12.

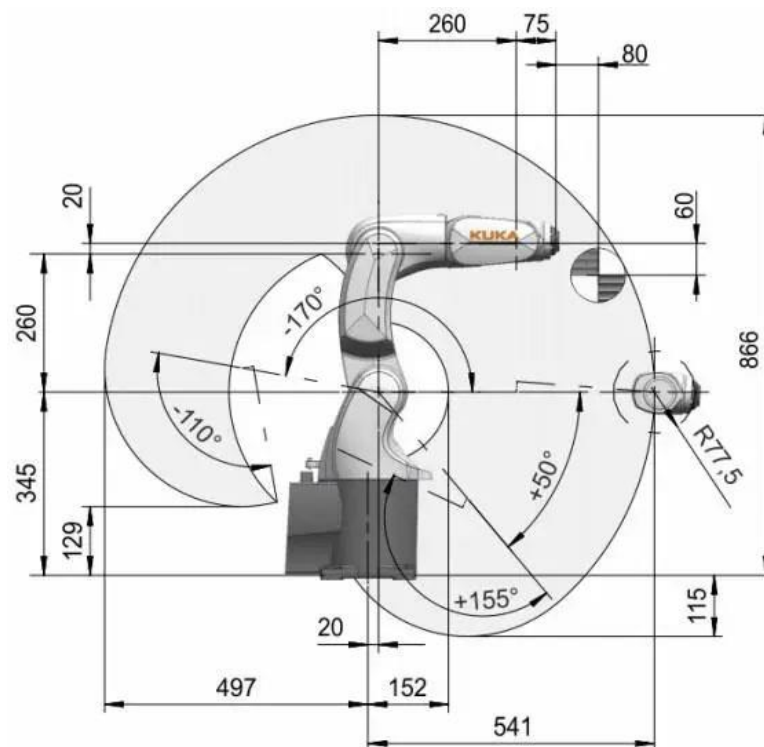


Рисунок 1.12 - Робочий простір та габаритні розміри ПР KUKA KR 3 R540

						БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			22

## Висновки до першого розділу

В даному розділі дипломної роботи розглянуті різні типи конструкцій промислових роботів, у тому числі спеціального призначення, проводиться аналіз і визначається конструкція, яка задовольняє поставлене завдання. Особлива увага приділяється шарнірним промисловим роботам як найкращому варіанту для виконання складних завдань. Шарнірні роботи мають універсальну конструкцію, що дозволяє їм виконувати рутинні операції, переміщувати та транспортувати різні об'єкти незалежно від людей.

Перевагою шарнірних промислових роботів є можливість переналаштування механічних пристроїв, перепрограмування алгоритму налаштування функцій і траєкторій руху робочих органів. Це дає змогу використовувати шарнірні роботи для виконання широкого спектру завдань у виробництві та логістичних системах, що значно підвищує їх ефективність та гнучкість у промислових процесах. Завдяки своїй конструкції, шарнірні роботи здатні адаптуватися до змін у виробничих умовах і забезпечувати високу точність і стабільність роботи, що робить їх найкращим вибором для сучасних автоматизованих систем.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

## 2 ПРОЕКТУВАННЯ МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТА

В цьому розділі описані конструкції основних частин робота. Проведений підбір електричних та електронних компонентів. Проектування проводилося у середовищі SolidWorks 2023.

### 2.1 Проектування шестиосьового маніпуляційного робота

Основною ідеєю даної роботи є розробка робота-маніпулятора для виготовлення за допомогою технології 3D-друку. Матеріалом, який використовується для друку деталей, є акрилонітрил-бутадієн-стирольний пластик (ABS), що вирізняється високою міцністю та стійкістю до механічних навантажень [5].

Була взята найпоширеніша схема, що зустрічається в промислових роботах-маніпуляторах різних фірм-виробників. Ця стандартна конфігурація включає три трансляційні (рух по осях X, Y, Z) та три поворотні (обертання навколо осей X, Y, Z) ступені свободи. Це надає їм здатність виконувати різні завдання у тривимірному просторі та взаємодіяти з об'єктами під різними кутами. Ступені свободи аналогічні тим, що показані на малюнку нижче (рис. 2.1).

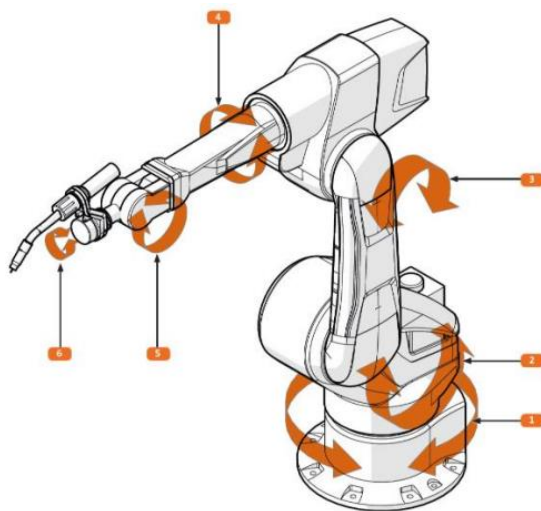


Рисунок 2.1 – Приклад кінематичної структури робота-маніпулятора

									Адк.
									24
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ				

## Конструкція маніпуляційного робота

При конструюванні деталей для друку на 3D принтері потрібно враховувати термоусадку пластику, оскільки вона позначається на невідповідності комп'ютерних моделей і реальних.

Також, щоб уникнути великих витрат, був вироблений наступний алгоритм дій:

- провести виміри для майбутньої деталі;
- спроектувати деталь з урахуванням термоусадки;
- роздрукувати деталь;
- перейти до пункту 1.

Досвідченим шляхом було з'ясовано, що термоусадка по горизонталі становить 1мм для однієї стінки (повна термоусадка залежить від кількості деталей і стінок), а по вертикалі - її майже немає. У подальшому моделі було спроектовано з її врахуванням.

Нижче описано зовнішній вигляд деталей і параметри для їх друку.

Для подальшого друку деталей, написання програми керування 3D - принтера проводиться слайсером в середовищі Ultimaker Cura v5.6.0 (рис. 2.3).

Слайсер - це програма, що розбиває тривимірну модель на шари для підготовки її до друку на 3D-принтері (рис.2.2). Вона перетворює тривимірний файл моделі (STL) на gcode-файл, який містить конкретні команди для 3D-принтера щодо друку кожного шару [6].

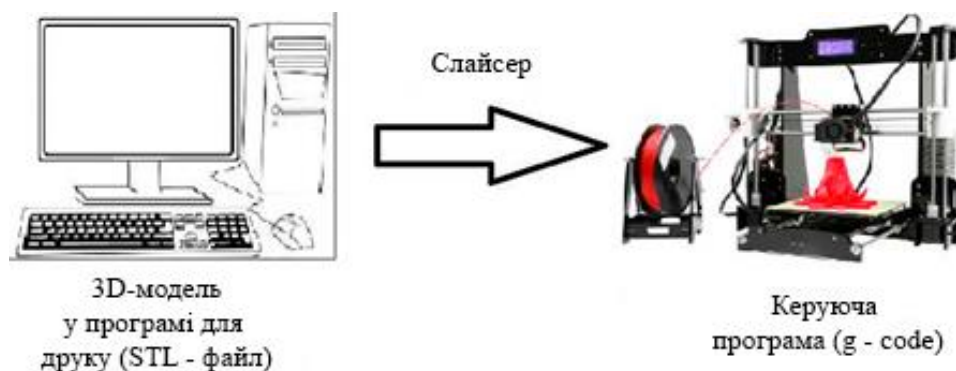


Рисунок 2.2 – Дія слайсера

									Арк.
									25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ				

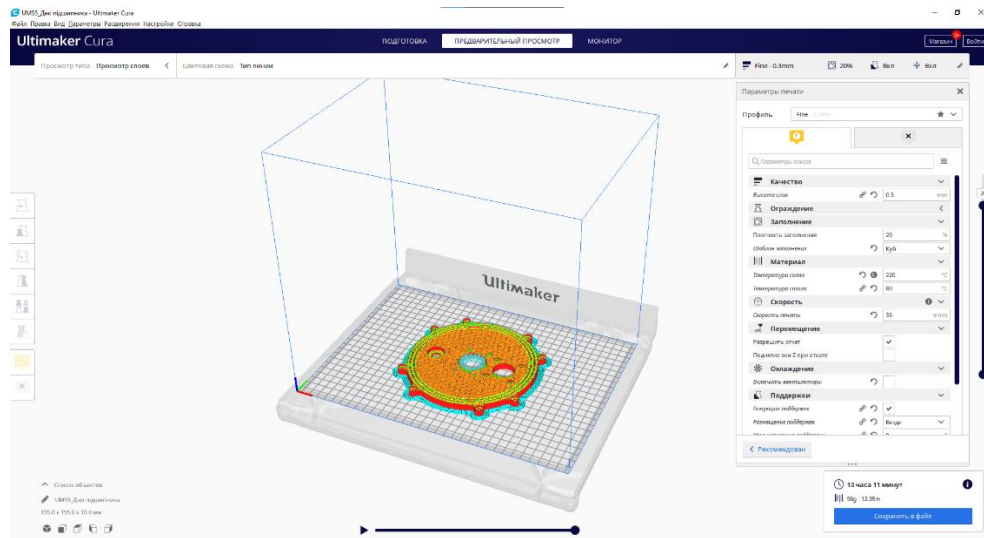


Рисунок 2.3 – Середовище UltiMaker Cura

У середовищі можна вибрати густину заповнення. Підбирається вона з урахуванням економії матеріалу та міцності конструкції. Використовувана фігура наповнення - куб, так як вона є простою, швидкою при друкуванні та відмінно тримає конструкцію.

Далі вказані характеристики друку у середовищі UltiMaker Cura основних деталей проєктованого маніпулятора (рис. 2.4 - 2.11).

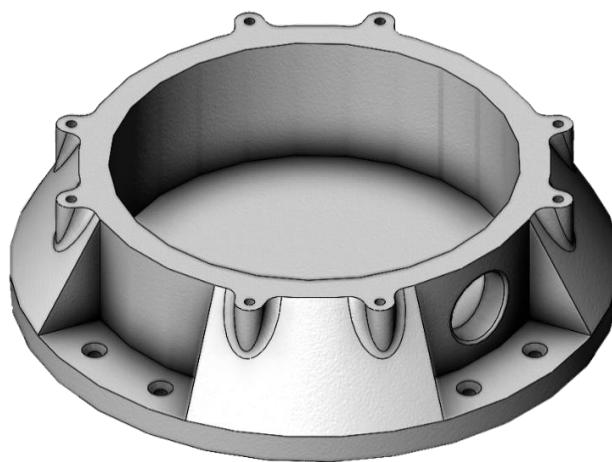


Рисунок 2.4 – Корпусна основа

Тип прилипання до столу - немає, так як основа - це найширша деталь.

										АДК.
										26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ					

Виконано отвір для кабелів управління двигуном. Корпусна частина повинна мати максимальну масу і, як наслідок, щільність заповнення для більшої стабільності, але не на шкоду бюджету. Кріпиться до дошки з ДСП болтами М4.

Таблиця 2.1 - Параметри друку основи та витрати

Характеристики	Значення
Щільність заповнення	30%
Тип прилипання до столу	Немає
Час друку (год.)	23.7
Кіл-сть пластику (г.)	319

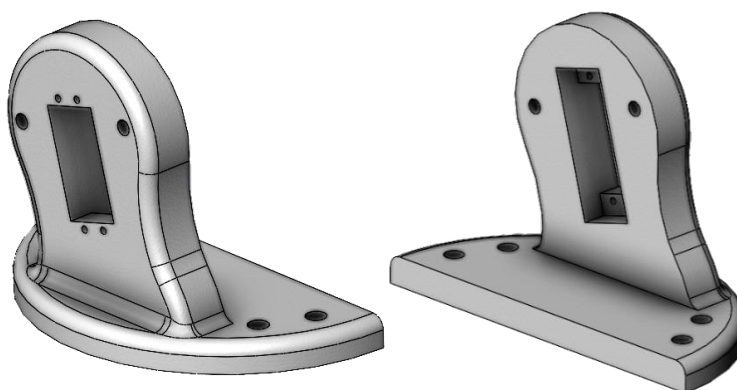


Рисунок 2.5 – Базове кріплення праве та ліве

Дані деталі є симетричними, виконані окремими частинами за для облегшення збірки маніпулятора. Мають місця під кріплення серводвигунів. Кріпляться до кришки підшипника гвинтами М4.

Таблиця 2.2 - Параметри друку одного кріплення та витрати

Характеристики	Значення
Щільність заповнення	30%
Тип прилипання до столу	Кайма
Час друку (год.)	13
Кіл-сть пластику (г.)	130

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Основа поворотного механізму корпусу що є нижньою опорою для підшипників. Кріпиться на восьми гвинтах М4. Має вирізи під вал крокового двигуна та потенціометра. Виконані отвори під гвинти М3 для кріплення двигуна.



Рисунок 2.6 – Основа поворотного механізму

Таблиця 2.3 - Параметри друку та витрати

Характеристики	Значення
Щільність заповнення	30%
Тип прилипання до столу	нема
Час друку (год.)	12
Кіл-сть пластику (г.)	112

Кришка корпуса робота що є верхньою опорою для підшипників. Кріпиться гвинтом М4. Має додаткові 6 отворів під гвинти М4.



Рисунок 2.7 – Обертова кришка підшипника з внутрішнім зачепленням

Таблиця 2.4 - Параметри друку кришки та витрати

Характеристики	Значення
Щільність заповнення	30%
Тип прилипання до столу	нема
Час друку (год.)	16
Кіл-сть пластику (г.)	152

Ліва та права частини плеча робота. Виконані вирізи за для облегшення конструкції. Права частина має місце під кріплення серводвигуна. Пророблені отвори під гвинти М3.



Рисунок 2.8 – Ліва та права частини “плеча” маніпулятора

Таблиця 2.5 – Параметри друку лівого і правого плеча та витрати

Характеристики	Значення
Щільність заповнення	30%
Тип прилипання до столу	Кайма
Час друку (год.)	13/12.5
Кіл-сть пластику (г.)	132/126

"Рука" маніпулятора складається з двох компонентів. Вона має кріплення для серводвигуна з посадковим місцем для "зап'ястя" та отвори для з'єднання з "плечем" маніпулятора. У кожному компоненті передбачено по чотири отвори М3 для забезпечення надійного скріплення обох частин.







## 2.2 Електроприводи маніпулятора

Електричні машини здатні перетворювати як механічну енергію в електричну, так і електричну енергію в механічну. Для перетворення електричної енергії в механічну використовуються електродвигуни.

Відмінність двигуна від приводу полягає в тому, що в другому, крім мотора, стоїть ще й пристрій керування. Нижче будуть підібрані види приводів, описані їх переваги та недоліки.

### Види приводів у робототехніці

При конструюванні маніпуляційного робота потрібен електропривод, що відповідає наступним властивостям:

- висока точність позиціонування;
- висока потужність;
- стабільність роботи;
- наявність зворотного зв'язку;
- низька ціна.

Виходячи з цього, в робототехніці, застосовуються 2 види двигунів, описані нижче [7-8].

### Кроковий двигун

Крокові двигуни - це тип електродвигунів, які рухаються або обертаються крок за кроком відповідно до вхідних сигналів керування. Кожен "крок" представляє собою фіксований кут або відстань, яку привід повинен здійснити при отриманні одного сигналу.

Перевагами крокових двигунів є висока точність позиціонування та можливість керування за допомогою мікрокроків для плавного руху. По суті, кроковий двигун є синхронним, але відрізняється підходом. Вони знаходять застосування в автоматизованих системах і пристроях, де якраз необхідна висока точність позиціонування, наприклад у принтерах, CNC-маршрутизаторах, автоматизованих системах виробництва, робототехніці, та інших галузях.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		33



Для зменшення швидкості застосовується редуктор, що являє собою систему з шестерень, які передають і змінюють крутний момент (рис. 2.12).

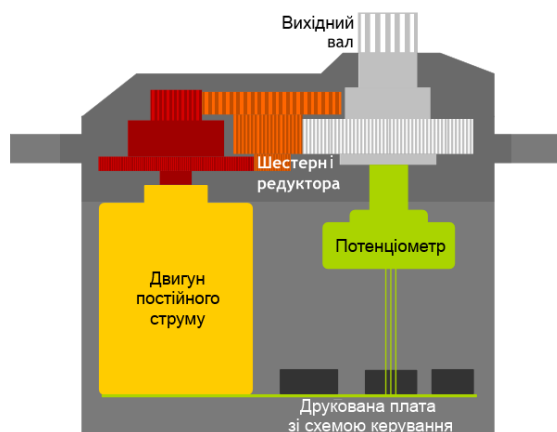


Рисунок 2.12 - Конструкція сервоприводу

Вмикаючи та вимикаючи електродвигун, можна керувати обертанням вихідного валу – кінцевою шестернею сервоприводу, до якої може бути приєднаний робочий орган або ланка робота. Однак для того, щоб пристрій міг контролювати положення валу, необхідний датчик зворотного зв'язку, такий як енкодер, який перетворює кут повороту в електричний сигнал (рис. 2.13). Часто для цієї мети використовується потенціометр. Коли бігунок потенціометра обертається, змінюється опір, що пропорційно куту повороту. Це дозволяє визначити поточне положення механізму.



Рисунок 2.13 - Зворотній зв'язок у сервоприводі

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

У сервоприводі, крім електродвигуна, редуктора та потенціометра, присутня електронна частина (перетворювач частоти, сервопідсилювач або інвертор), що відповідає за зчитування значень з потенціометра, прийом зовнішніх параметрів і керування увімкненням або вимкненням мотора. Ця частина також відповідає за забезпечення від'ємного зворотного зв'язку.

Величина кроку переміщення визначається вирішальною здатністю датчика зворотного зв'язку, енкодера, а також блоком управління. Стандартні сервоприводи можуть забезпечити крок  $0,036^\circ$  тобто.  $1/10\ 000$  від обороту, і це на швидкостях до 5000 об/хв. Найсучасніші сервоприводи відпрацьовують крок  $1/2\ 500\ 000$ .

Відмінність цифрового сервоприводу від аналогового

Як таких зовнішніх відмінностей між цифровими та аналоговими сервоприводами немає, тобто можуть використовуватися ті ж двигуни, шестерні, потенціометри, крім електронної частини, а саме:

- у аналоговому сервоприводі присутній чіп логіки та компоненти, що визначають тимчасові відрізки.
- у цифровому сервоприводі встановлений мікропроцесор з кварцовим генератором, який приймає імпульси, аналізує їх та керує мотором.

Тому у фізичному виконанні різниця проявляється лише способом обробки імпульсів та управлінням мотором. [8].

Переваги цифрового сервоприводу перед аналоговим:

На деяких цифрових сервоприводах доступна прошивка керуючого процесора. Цим можна досягти зміни продуктивності сервоприводу.

Обидва типи сервоприводів приймають ідентичні керуючі імпульси. Аналоговий сервопривід, після отримання імпульсу, визначає необхідність зміни положення і, якщо потрібно, надсилає сигнал на двигун з частотою 50 Гц, що забезпечує малий час реакції в 20 мс. В цей період будь-який зовнішній вплив може змінити положення сервоприводу. Проте, це не єдина проблема. У стані спокою на електромотор не подається напруга, а при невеликому відхиленні від

									Адк.
									36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ				

рівноваги подається короткий слабкий сигнал. Чим більше відхилення, тим сильніший сигнал. Внаслідок цього, при малих відхиленнях сервопривід не може швидко обертати двигун або створювати великий момент, що призводить до виникнення "мертвих зон" по часу і відстані.

Ці проблеми можна вирішити шляхом збільшення частоти прийому, обробки сигналу і керування електромотором.

Цифрові сервоприводи використовують спеціальний процесор для обробки керуючих імпульсів і відправки сигналів на мотор із частотою 200 Гц і більше. Це дозволяє їм швидше реагувати на зовнішні впливи, швидше досягати необхідної швидкості та крутного моменту і краще утримувати задану позицію. Такий підхід надає вагому перевагу у функціональності сервоприводу.

Більш наглядно цю інформацію можна побачити на рисунку 2.14.

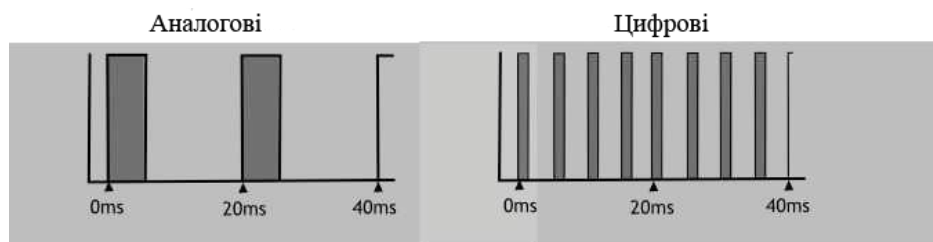


Рисунок 2.14 – Перевага цифрового сервоприводу перед аналоговим

На практиці це означає, що на коротких проміжках часу, напруга, що подається на цифровий сервопривід буде зростати швидше, а разом з цим збільшується і швидкість повороту вихідного валу, крутний момент і сервопривід позиціонується точніше.

Недоліки цифрового сервоприводу:

Енергоспоживання таких сервоприводів вище. Також цифрові сервоприводи важчі у виробництві, а тому коштують помітно дорожче в порівнянні з аналоговими.

Отже, цифровий сервопривід більше підходить для використання, якщо потрібно:

- більш висока роздільна здатність - менша мертва зона, більш точне позиціонування;
- швидша реакція управління - збільшення прискорення на коротких проміжках часу;
- постійний обертовий момент всьому шляху руху на сервоприводу;
- підвищення моменту утримання, коли гойдалка позиціонується у нерухомому положенні.

Для решти відмінно підійдуть і аналогові серводвигуни.

### Сервоприводи MG996R та DS3218

Виходячи з необхідних параметрів, а саме з того, що сервопривід повинен мати: максимальний обертовий момент, точність позиціонування, мінімальні розміри, масу і споживаний струм, мати металевий редуктор для більшої міцності і стабільності позиціонування, бути доступним для можливої заміни, економічно-ефективним - таким чином, вибір упав на два відомих цифрових сервоприводи: MG996R – для менш навантажених елементів робота, та DS3218 – для інших навантажених елементів [9-10]. Розміри сервоприводів DS3218 та MG996R відповідно показані на рисунках 2.15 – 2.16.

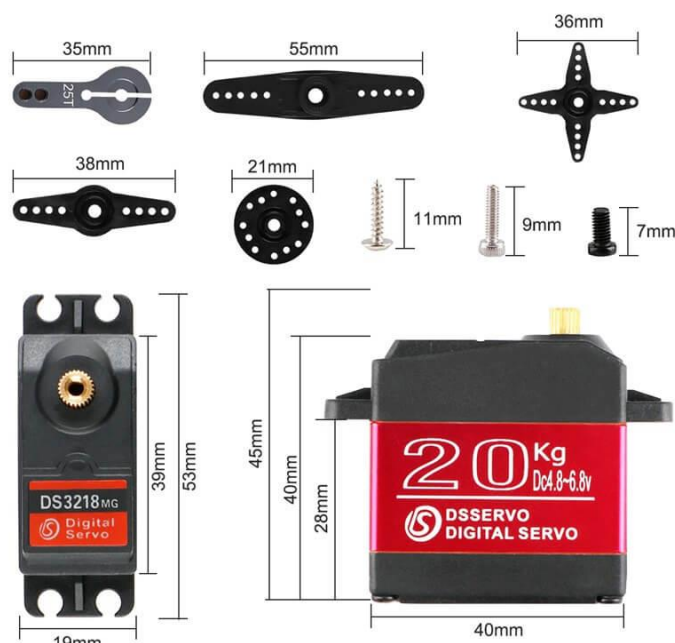


Рисунок 2.15 – Розміри сервоприводу DS3218

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38





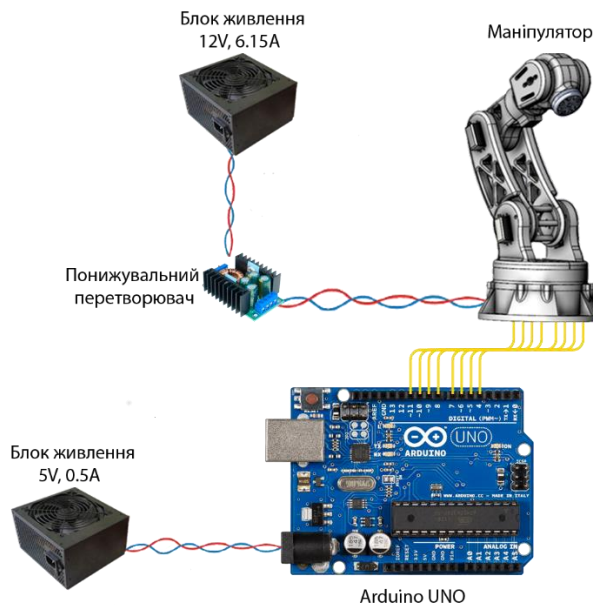


Рисунок 2.18 – Ілюстративна схема підключення компонентів робота

### Плата Arduino

«Мозком» проектованого маніпулятора, служить плата серії Arduino, а саме Arduino Uno R3 (рис. 2.19). Arduino відзначається своєю доступністю та широким використанням завдяки розгалуженій екосистемі програмного забезпечення. Заснована на мові програмування C++, платформа пропонує зручний і вдосконалений інтерфейс для створення різноманітних проектів. Має наступні характеристики [11]:

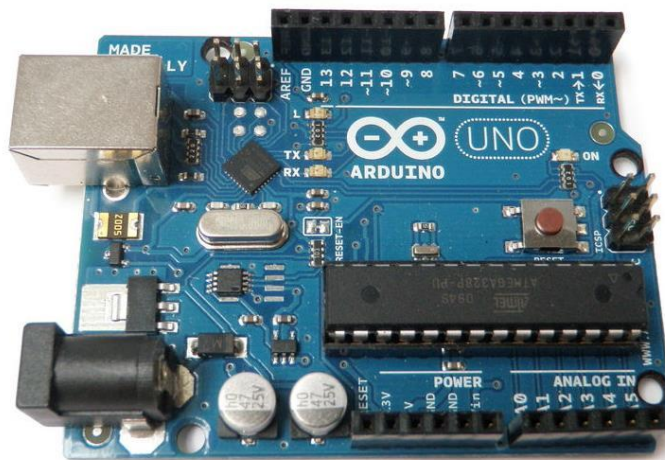


Рисунок 2.19 – Плата Arduino Uno R3

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		41

Таблиця 2.8 – Характеристики Arduino Uno

Мікроконтролер	ATmega328
Робоча напруга	5В
Напруга живлення (рекомендоване)	7-12В
Напруга живлення (попередньо)	6-20 В
Цифрові входи/виходи	14 (з них 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи)
Аналогові входи	6
Максимальний струм одного виведення	40 мА
Максимальний вихідний струм виведення 3.3V	50 мА
Flash-пам'ять	32 КБ (ATmega328) з яких 0.5 КБ використовуються завантажувачем
SRAM	2 КБ (ATmega328)
EEPROM	1 КБ (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц

### Блок живлення

Для підтримки роботи всієї електроніки та приводів потрібно джерело живлення. Для цього добре підійде звичайний комп'ютерний блок живлення на 12V. Використовуваний в розробці блок живлення показаний на рисунку 2.20.



Рисунок 2.20 – Комп'ютерний блок живлення

Понижуючий перетворювач DC-DC Step-Down з регулюванням струму та напруги

Так як електроніка і сервоприводи живляться, як правило, від 5-6V, а блок живлення видає 12V, то потрібно перетворити струм з одного значення в інше. Для цього і знадобиться знижуючий Step-Down перетворювач.

DC-DC перетворювач - це електронний пристрій, призначений для зниження вхідної напруги до заданого рівня на виході. Він базується на силових ключах та трансформаторі, що забезпечує ефективне та стабільне зниження напруги.

Окрім того, він також оснащений функцією регулювання струму, що дозволяє точно контролювати потужність, яка подається на навантаження.

Виходячи з того, що треба регулювати не тільки напругу, а й струм, вибір упав на DC-DC Step-Down перетворювач XL4016 [12].



Рисунок 2.21 – понижуючий перетворювач XL4016

#### 2.4 Управління маніпуляційним роботом

Кінематикою роботів називається систематичне вчення про рух динамічної робототехнічної системи в тривимірному просторі залежно від часу без урахування сил та моментів, що породжують такий рух.

У даній роботі буде розглянуто приклад рішення прямої та представлено рішення для автоматичного обрахунку оберненої задачі кінематики для проєктованого триланкового маніпуляційного робота з шістьма ступенями свободи (рухливості).

										Арк.
										43
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата						

## Пряма задача кінематики

Розглянемо теоретичну частину роботи маніпулятора. Пряме та обернене завдання кінематики вирішують процес управління положення захвату маніпулятора в просторі.

Саме управління відбувається у просторі узагальнених координат [13].

Пряме завдання – це обчислення положення  $(x, y, z)$  робочого органу маніпулятора за його кінематичною схемою та заданою орієнтацією  $(A_1, A_2 \dots A_n)$  його ланок ( $n$  – число ступенів свободи маніпулятора,  $A$  – кути повороту). На рисунку 2.22 наведено схему дволанкового маніпулятора.

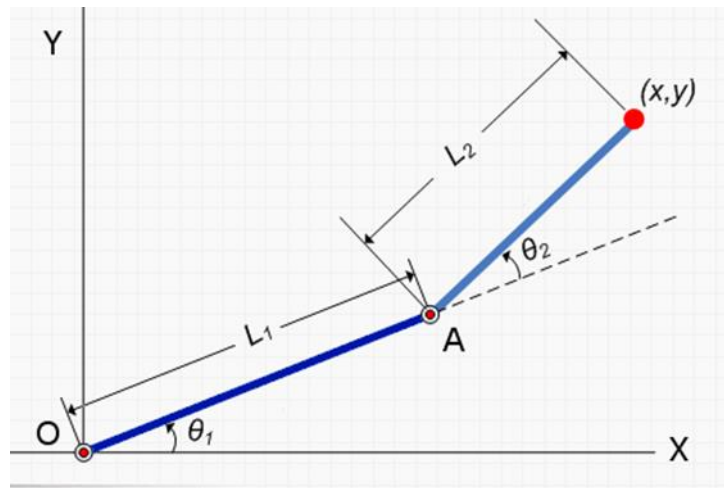


Рисунок.2.22 - Схема дволанкового маніпулятора

$L_1$  – перший суглоб, який кріпиться на підставці та кут повороту становить  $Q_1$ .  $L_2$  – другий суглоб, який кріпить перший суглоб і його кут повороту становить  $Q_2$ .

Рішення:

Обчислення зміщення точки A відносно точки O.

$$x_A = L_1 \cdot \cos(Q_1), \quad (2.1)$$

$$y_A = L_1 \cdot \sin(Q_1). \quad (2.2)$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		44

Знаходження координати (x, y) у просторі ліктя:

$$x'' = L_2 \cdot \cos(Q_2), \quad (2.3)$$

$$y'' = L_2 \cdot \sin(Q_2). \quad (2.4)$$

По рисунку видно, що у системі O, лікоть  $L_1$  повернуті щодо плеча на  $Q_1 + Q_2$ :

$$x' = L_2 \cdot \cos(Q_1 + Q_2), \quad (2.5)$$

$$y' = L_2 \cdot \sin(Q_1 + Q_2). \quad (2.6)$$

Знаходження загальної формули:

$$x = x_A + x' = L_1 \cdot \cos(Q_1) + L_2 \cdot \cos(Q_1 + Q_2), \quad (2.7)$$

$$y = y_A + y' = L_1 \cdot \sin(Q_1) + L_2 \cdot \sin(Q_1 + Q_2). \quad (2.8)$$

Обернена задача кінематики

Обернена задача - це обчислення кутів ( $A_1, A_2 \dots A_n$ ) за заданим положенням (x, y, z) робочого органу і знову ж таки відомою схемою його кінематики. Тобто рішення оберненої задачі каже: як потрібно розташувати кожний зв'язок чи суглоб, як потрібно «вивернутися» маніпулятору, щоб його робочий орган опинився в заданому положенні.

При вирішенні оберненої задачі можуть виникнути такі проблеми:

- одночасно кілька рішень (багатоекстремальність). Це пояснюється безліччю точок мінімуму у вирішенні зворотного завдання;
- знайдена точка (результат) може не відповідати шуканій точці (заданій).

Це пояснюється тим, що помилка в разі найкоротшого шляху може бути мінімальною, а в разі інших шляхів - більшою чи максимальною.

На рисунку 2.23 наведено кінематичну схему проектованого шестиосьового маніпуляційного робота.

										Арк.
										45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ					

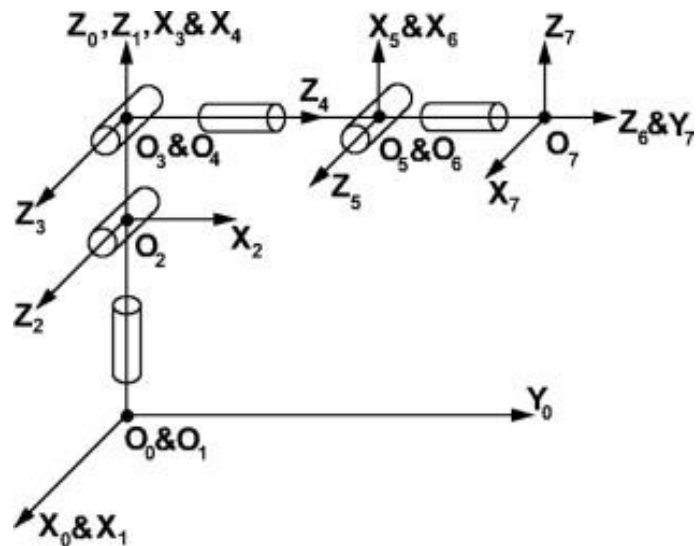


Рисунок 2.23 – Кінематична схема маніпуляційного робота

Дано просторовий маніпулятор, який складається із трьох рухомих, та однієї закріпленої ланок довжиною  $L_0, L_1, L_2$  та  $L_3$ . Необхідно знайти кути  $Q_0, Q_1, Q_2$  та  $Q_3$ , на які необхідно повернути ланки маніпулятора для того, щоб перемістити робочий орган у задану точку з координатами  $(x, y, z)$ .

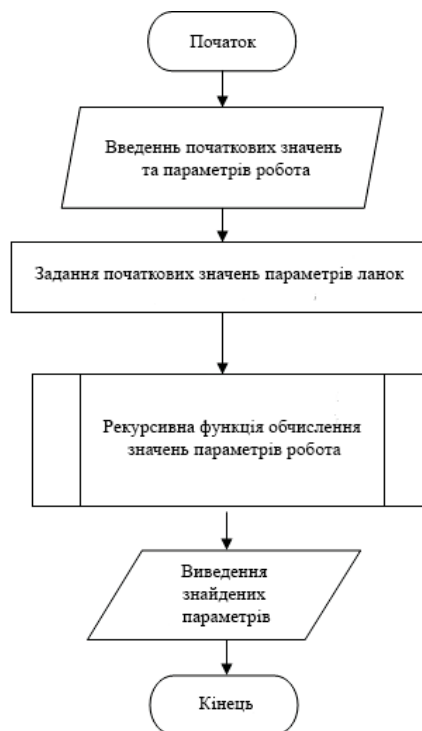


Рисунок 2.24 – Алгоритм вирішення оберненої задачі

На основі алгоритмів для розв'язання оберненої задачі кінематики (рис. 2.24), було складено програму в середовищі автоматизованого проектування Fusion 360, для автоматичного визначення необхідних кутів повороту серводвигунів та крокового двигуна маніпулятора [1].

Fusion 360 - це інтегроване програмне забезпечення для комп'ютерного проектування і виробництва, розроблене компанією Autodesk. Воно забезпечує можливість моделювання 3D-об'єктів, конструювання деталей та збірних одиниць, створення та аналізу ескізів, а також генерацію та редагування КАМ-шляхів для виробництва за допомогою числово-програмних верстатів (ЧПУ).

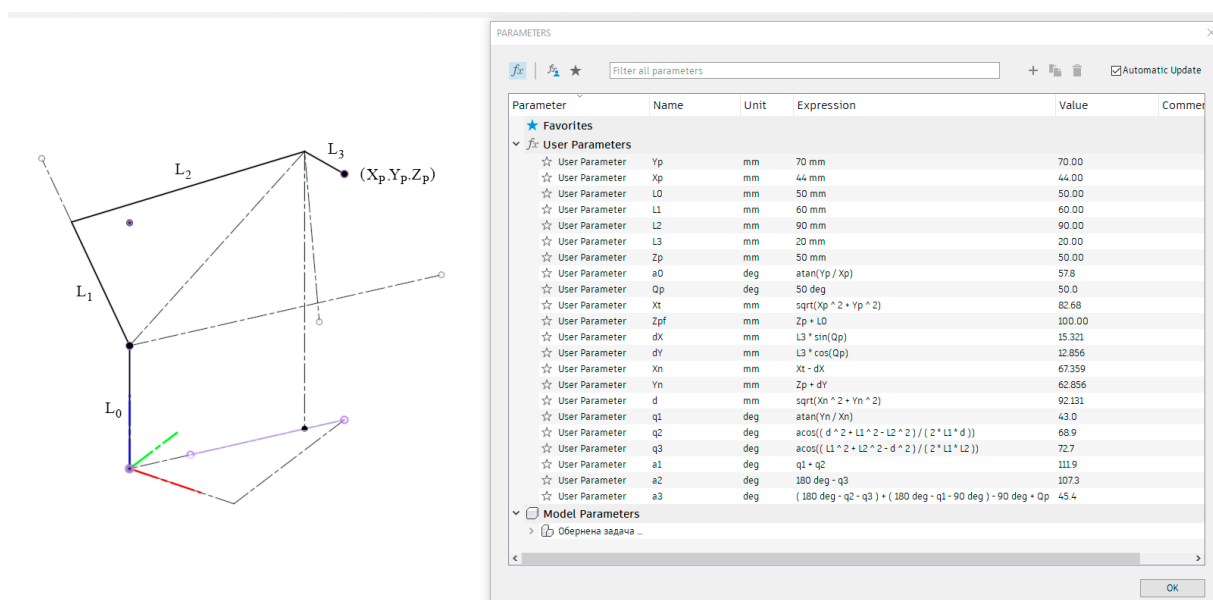


Рисунок 2.25 – Програма у Fusion 360 для розрахунку оберненої задачі кінематики маніпулятора

Вхідними даними для даної програми є довжини ланок маніпулятора  $L_0, L_1, L_2, L_3$  та координати  $Y_p, X_p, Z_p$  в яких потрібно розмістити кінцевий ефектор. Додатково вказується необхідний кут повороту  $Q_p$ , кінцевого ефектора  $L_3$ , відносно нульової позиції (у даному випадку перпендикулярно до попередньої ланки  $L_2$ ). На основі цих даних програма виконує розрахунок необхідних кутів повороту кожної ланки для досягнення заданої позиції.

Кут  $a_0$  встановлює кут повороту всієї площини, в якій діє система, відносно нульової позиції. Це означає, що спочатку виконується поворот площини в тривимірному просторі, а потім задача вирішується для плоскої схеми в двовимірній координатній системі. Такий підхід дозволяє спростити вирішення задачі, зведучи тривимірну кінематичну задачу до двовимірної, що значно полегшує математичні розрахунки.

Кут повороту площини:

$$a_0 = \text{atan} \frac{Y_P}{X_P}; \quad (2.9)$$

$X_t$  – це пряма, що сполучає початок координат  $O$  із заданою точкою  $(x, y)$  в горизонтальній площині:

$$X_t = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad (2.10)$$

Змінна  $Z_{Pf}$  являє собою суму довжини першої, нерухомої в двовимірній координатній системі, ланки  $L_0$  та координати положення кінцевого ефектора по осі  $Z_P$ :

$$Z_{Pf} = Z_P + L_0; \quad (2.11)$$

Змінні  $d_X$  та  $d_Y$  визначають відповідно зміщення кінцевого ефектора маніпулятора по осях  $Y_P$  та  $X_P$  у робочій площині відносно ланки  $L_2$ . Ці величини використовуються для точного керування рухами маніпулятора:

$$d_X = L_3 \cdot \sin(Q_P); \quad (2.12)$$

$$d_Y = L_3 \cdot \cos(Q_P); \quad (2.13)$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Кординати  $X_n$  та  $Y_n$  вказують відстань від початку координат  $O$ , до місця з'єднання кінцевого ефектора з ланкою  $L_2$ :

$$X_n = X_t - d_X; \quad (2.14)$$

$$Y_n = Z_p + d_Y. \quad (2.15)$$

Пряма  $d$  сполучає початок координат  $O$  із точкою сполучення ланки  $L_2$  та кінцевого ефектора  $L_3$ :

$$d = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2}. \quad (2.16)$$

Кут  $q_1$  визначає нахил прямої  $d$  відносно осі координат  $X$ :

$$q_1 = \text{atan} \left( \frac{Y_n}{X_n} \right). \quad (2.17)$$

Кути  $q_2$  та  $q_3$  знаходяться за допомогою загально відомої теореми косинусів, згідно якої для плоского трикутника зі сторонами  $a, b, c$  і кутом  $\alpha$ , протилежним стороні  $a$ , справедливе співвідношення:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos(\alpha). \quad (2.18)$$

З теореми косинусів для кута  $q_2$  отримується:

$$q_2 = \arccos \left( \frac{d^2 + L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot d} \right). \quad (2.19)$$

Для кута  $q_3$  отримується:

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

$$q_3 = \arccos\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - d^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}\right). \quad (2.20)$$

Кут  $a_1$  визначає нахил ланки  $L_1$  відносно осі координат  $X$ . Є сумою двох кутів  $q_1$  та  $q_2$ :

$$a_1 = q_1 + q_2. \quad (2.21)$$

Кут  $a_2$  визначає нахил ланки  $L_3$  відносно ланки  $L_2$ :

$$a_2 = 180^\circ - q_3. \quad (2.22)$$

Кут  $a_3$  визначає нахил ланки  $L_3$  відносно нульової позиції, що є перпендикулярною до попередньої ланки  $L_2$ . Враховуються всі необхідні внутрішні кути  $q_1, q_2, q_3$ , та заданий кут  $Q_p$ , забезпечуючи точне позиціонування ланки в просторі.

Кут нахилу кінцевого ефектора відносно нульової позиції:

$$a_3 = (180^\circ - q_2 - q_3) + (180^\circ - q_1 - 90^\circ) - 90^\circ + Q_p. \quad (2.23)$$

## Висновки до другого розділу

У даному розділі дипломної роботи проведено ґрунтовний аналіз та проектування шестиосьового маніпуляційного робота. Розглянуто конструкцію робота, його складові елементи, а також визначено технічну архітектуру. Було детально описано вибір електроприводів, електричних та електронних компонентів, включаючи плату Arduino, систему живлення та понижуючий перетворювач DC-DC Step-Down для забезпечення живлення елементів проекту.

Одним з ключових аспектів розробки стало вирішення оберненої задачі

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

кінематики для проєктованого маніпуляційного робота з використанням системи автоматизованого проєктування Fusion 360. Були детально описані етапи розрахунків необхідних кутів повороту ланок маніпулятора для досягнення заданої позиції робочого органу. Розрахунки та моделювання підтвердили здатність системи досягати високої точності в управлінні рухами робота.

Отримані результати свідчать про стабільну та ефективну роботу маніпуляційного робота, що здатен забезпечувати необхідну точність і швидкість виконання завдань у різноманітних умовах застосування.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
						51
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		



Матеріалом для виготовлення шестерні та колеса обрано 3D-пластик Nylon з межею міцності на згин та розрив 57 МПа. Цей матеріал відзначається високою міцністю і доброю стійкістю до зношування, що робить його чудовим вибором для деталей, що працюють в умовах значного механічного навантаження [5].

Допустиме контактне напруження для зубців колеса:

$$[\sigma]_H = 57 \text{ МПа.}$$

Допустимі напруження на згин

У зубцях шестерні:

$$[\sigma]_{F1} = 57 \text{ МПа.}$$

У зубцях колеса:

$$[\sigma]_{F2} = 57 \text{ МПа.}$$

Міжосьова відстань

$$a = (u_2 - 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{10800 Z_\varepsilon K_H T_1}{[\sigma]_H u_2 \psi_{ba}}}, \quad (3.1)$$

де  $K_H$  – коефіцієнт навантаження за контактними напруженнями;

$K_H = 1,5 \dots 1,7$ , прийнято  $K_H = 1,5$ ;

$u_2$  – передатне число, прийнято  $u_2 = 4$ ;

$T_1$  – обертовий момент двигуна, прийнято  $T_1 = 0,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

$\psi_{ba}$  – коефіцієнт відносної ширини, для передач загального призначення оптимально  $\psi_a = 0,215 \dots 0,4$ , прийнято  $\psi_a = 0,25$ .

$$a = (4 - 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{10800 \cdot 0,9 \cdot 1,5 \cdot 0,4}{57 \cdot 4 \cdot 0,25}} = 49,04 \text{ мм,}$$

прийнято стандартне значення міжосьової відстані:

$$a = 50 \text{ мм. [14, табл. 4.4, с. 40]}$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модуль зачеплення

$$m = (0.01 \dots 0.02)a = (0.01 \dots 0.02) \cdot 100 = 0.5 \dots 1 \text{ мм.} \quad (3.2)$$

Прийнято  $m = 1$  мм.

Різниця зубців

$$Z_p = Z_1 + Z_2 = \frac{2a}{m} = \frac{2 \cdot 50}{1} = 100. \quad (3.3)$$

Числа зубців спряжених коліс

Шестерні:

$$Z_1 = \frac{Z_p}{u_2 - 1} = \frac{100}{4 - 1} = 33.3. \quad (3.4)$$

Прийнято  $Z_1 = 33$ .

Колеса:

$$Z_2 = Z_p + Z_1 = 100 + 33 = 133. \quad (3.5)$$

Уточнення коефіцієнта навантаження  $K_H$

Ширина колеса (зубчастого вінця):

$$b_{w2} = \psi_{ba} \cdot a = 0.25 \cdot 50 = 12.5 \text{ мм.} \quad (3.6)$$

Прийнято  $b_{w2} = 15$  мм.

Ділильний діаметр шестерні:

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d_1 = mz_1 = 1 \cdot 33 = 33 \text{ мм.} \quad (3.7)$$

Коефіцієнт ширини шестерні:

$$\psi_{bd} = \frac{b_{w2}}{d_1} = \frac{15}{33} = 0.45. \quad (3.8)$$

Коефіцієнт концентрації навантаження:

$$K_{H\beta} = 1.27 \text{ [14, табл. 48, с. 92]}$$

Коефіцієнт динамічного навантаження:

$$K_{HV} = 1 \text{ [14, табл. 48, с. 92]}$$

Коефіцієнт навантаження:

$$K_H = K_{H\beta} \cdot K_{HV} = 1.27 \cdot 1 = 1.27. \quad (3.9)$$

Перевірка контактних напружень

$$\sigma_H = \frac{10800Z_\varepsilon}{au_2} \sqrt{\frac{(u-1)^3}{b_{w2}} K_H T_1} \leq [\sigma]_H, \quad (3.10)$$

$$\sigma_H = \frac{10800 \cdot 0.9}{50 \cdot 4} \sqrt{\frac{(4-1)^3}{15} \cdot 1.27 \cdot 0.4} = 46.47 < [\sigma]_H = 57 \text{ МПа.}$$

Контактна міцність забезпечується, оскільки  $\sigma_H < [\sigma]_H$ .

### 3.2 Перевірка міцності зубців на згин

Відношення для шестерні:

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{[\sigma]_{F1}}{Y_{F1}} = \frac{57}{3.79} = 15.03 \text{ МПа.} \quad (3.11)$$

де  $Y_{F1}$  коефіцієнт форми зуба шестерні:

$$Y_{F1} = 3.6 + \frac{4.5}{Z_1 - 10} = 3.6 + \frac{4.5}{33 - 10} = 3.79. \quad (3.12)$$

Відношення для колеса:

$$\frac{[\sigma]_{F2}}{Y_{F2}} = \frac{57}{3.63} = 15.07 \text{ МПа.} \quad (3.13)$$

де  $Y_{F2}$  коефіцієнт форми зуба колеса:

$$Y_{F2} = 3.6 + \frac{4.5}{Z_2 - 10} = 3.6 + \frac{4.5}{133 - 10} = 3.63. \quad (3.14)$$

Таким чином, шестерня є менш міцною, тому що  $\frac{[\sigma]_{F1}}{Y_{F1}} < \frac{[\sigma]_{F2}}{Y_{F2}}$ , а тому перевірка на згин ведеться для зубців шестерні.

$$\sigma_{F1} = \frac{2 \cdot 10^3 Y_{F1} K_F T_1}{m^2 Z_1 b_{w1}}, \quad (3.15)$$

де  $K_F$  – коефіцієнт навантаження при розрахунку на згин.

$$K_F = K_{F\beta} \cdot K_{FV} = 1.52 \cdot 1.25 = 1.9. \quad (3.16)$$

$K_{F\beta}$  – коефіцієнт концентрації навантаження;

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_{F\beta} = 1.52 [14, \text{табл. 48, с. 92}];$$

$K_{FV}$  – коефіцієнт динамічного навантаження;

$$K_{FV} = 1.25 [14, \text{табл. 49, с. 92}].$$

$$\sigma_{F1} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 3.79 \cdot 1.9 \cdot 0.4}{1^2 \cdot 33 \cdot 10} = 17.45 < [\sigma]_{F1} = 57 \text{ МПа.}$$

Таким чином, міцність зубців на згин забезпечується,  
оскільки  $\sigma_{F1} < [\sigma]_{F1}$ .

### 3.3 Розміри вінців зубчастих коліс

Ділильні діаметри:

Шестерні:

$$d_1 = mz_1 = 1 \cdot 33 = 33 \text{ мм.} \quad (3.17)$$

Колеса:

$$d_2 = mz_2 = 1 \cdot 133 = 133 \text{ мм.} \quad (3.18)$$

Діаметри вершин зубців:

Шестерні:

$$d_{a1} = d_1 + 2m = 33 + 2 \cdot 1 = 35 \text{ мм.} \quad (3.19)$$

Колеса:

$$d_{a2} = d_2 - 2m = 133 - 2 \cdot 1 = 131 \text{ мм.} \quad (3.20)$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ширина вінців коліс:

$$b_{w2} = \psi_{ba} \cdot a = 0.25 \cdot 50 = 12.5 \text{ мм.} \quad (3.21)$$

Прийнято  $b_{w2} = 15 \text{ мм.}$

$$b_{w1} = b_{w2} + (5 \dots 10) \text{ мм.} = 15 + 5 = 20 \text{ мм.} \quad (3.22)$$

### 3.4 Зусилля у зачепленні зубців передачі

Колові сили:

$$F_{t1} = F_{t2} = \frac{2000 \cdot T_1}{d_2} = \frac{2000 \cdot 0.4}{133} = 6.01 \text{ Н;} \quad (3.23)$$

Радіальні сили:

$$F_{r1} = F_{r2} = F_{t1} \cdot \operatorname{tg} \alpha = 6.01 \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 2.187 \text{ Н.} \quad (3.24)$$

### Висновки до третього розділу

У даному розділі дипломної роботи виконано розрахунки основних механічних елементів конструкції приводу промислового робота. Здійснено вибір оптимальної конструкції редуктора та проведено розрахунок його параметрів з урахуванням вимог до функціонування робота. За результатами розрахунків відомо, що навантаження на вибрані конструктивні елементи значно менше допустимих, отже вибір конструктивних елементів здійснений вірно.

Обрані параметри конструктивних елементів забезпечують надійну та ефективну роботу механічного приводу промислового робота.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		58

## ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи, присвяченої розробці конструкції промислового робота з використанням адитивних технологій на основі платформи Arduino, було отримано значний практичний досвід у сферах реверс-інжинірингу, проектування, конструювання та оформлення креслень, відповідно до встановлених стандартів, а також у збиранні та налаштуванні маніпуляційного робота.

В ході вивчення та проектування маніпуляційного робота важливою складовою була взаємодія з 3D-принтером, що використовувався як об'єкт вивчення. Цей процес сприяв набуттю як теоретичних, так і практичних знань щодо структури та роботи його компонентів. Був також отриманий досвід у налаштуванні принтера для досягнення вищої якості друку деталей маніпуляційного робота. Додатково, було проведено реадaptaцію 3D-моделей для подальшого аналізу міцності всієї збірки в системі автоматизованого проектування SOLIDWORKS Simulation.

При виборі електронних компонентів визначався критерій для кожного з них виходячи з потреб та розрахунків. Була розроблена блок-схема пристрою, для розробки системи управління маніпулятором. Досліджена обернена задача кінематики, що дозволить вдосконалити систему управління маніпуляційним роботом.

Проведено розрахунки та вибір оптимальної конструкції редуктора для приводу промислового робота. Результати підтверджують правильність вибору конструкційних елементів, забезпечуючи надійну та ефективну роботу.

Загалом, у результаті виконання даної роботи, був не тільки успішно розроблений робот-маніпулятор, а й отриманий широкий спектр навичок у важливих галузях інженерії та технологій. Процес вивчення, експериментування та вирішення реальних завдань виявився не лише викликом, але й можливістю розвинути власні здібності та зануритися у захоплюючий світ робототехніки.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Ніколайчук В.М. Основи робототехніки: Навчальний посібник - Рівне: НУВГП, 2008, – 76 с.
2. Поліщук Л.К. Верстатні комплекси: Проектування робіт та маніпуляторів. Частина 1 – Вінниця: ВНТУ, 2018 – 133 с.
3. Пелевін Л.Є., Почка К. І., Гаркавенко К. І. та ін. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні – К.: Інтерсервіс, 2016. – 258 с.
4. ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://kaf-av.tntu.edu.ua/index.php/mn-abiturient/mn-articles/676-art>
5. Поліщук О.С., Зозуля П.Ф., Поліщук А.О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. – Хмельницький: ХНУ, 2017 – 9 с.
6. Манжілевський О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. СУЧАСНІ АДТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ 3D ДРУКУ. ОСОБЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ – Вінниця: ВНТУ 2021. – 106 с.
7. Павленко Т. П., Шавкун В. М., Козлова О. С., Лукашова Н. П. Сучасні електромехатронні комплекси і системи – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 116 с.
8. Різниця і вибір крокового приводу і сервоприводу [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.hybridservos.com/news/difference-selection-stepper-drive- servo-drive-21513673.html>
9. Сервопривід Tower Pro MG996R [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.vodomet.in.ua/shop/komplektuyushhie/servoprivod-towerpro-mg996r/>
10. Сервопривід DSSERVO DS3218 Pro [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://vseplus.com/ua/product/servoprivid-dsservo-ds3218-pro-178342>
11. Arduino Uno R3 ATmega328 програмований контролер [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://sxema.com.ua/ua/p621632355-arduino-uno-atmega328.html>
12. Понижуючий перетворювач XL4016 з регулюванням струму і напруги

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		60

[Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ardi.in.ua/ua/p530655170-ronizhayuschij-preobrazovatel-xl4016.html>

13. Лабораторна робота №1. Моделювання задач кінематики роботів-маніпуляторів типу Niryо One. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://msn.khmnu.edu.ua/pluginfile.php/631602/mod\\_resource/content/2/Лабораторна%20робота%20№1.pdf](https://msn.khmnu.edu.ua/pluginfile.php/631602/mod_resource/content/2/Лабораторна%20робота%20№1.pdf)

14. Пастух І.М., Харжевський В.О., Олександренко В.П. Деталі машин. Курсове проектування: навчальний посібник – Хмельницький: ХНУ, 2023. – 242 с.

15. Тема 1. Основні визначення, класифікація та характеристики маніпуляторів та промислових роботів [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://msn.khmnu.edu.ua/pluginfile.php/687865/mod\\_resource/content/1/Тема%201.pdf](https://msn.khmnu.edu.ua/pluginfile.php/687865/mod_resource/content/1/Тема%201.pdf)

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Адк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>61</i>

# ДОДАТКИ

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		