

Міністерство освіти і науки України Харківський національний  
університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

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

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна  
записка**

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Розроблення програмного забезпечення для симуляції

промислового робота-маніпулятора

(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,

групи АКТСІ -21-2

Петро ГРАБАР

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та

комп'ютерно - інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник ас.каф.КІТАР Роман СТРИЛЕЦЬ

(підпис)

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Грабар Петро Олександрович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАР

Ігор НЕВЛЮДОВ

використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«31» травня 2025 р



Петро ГРАБАР

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані \_\_\_\_\_  
технології Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна \_\_\_\_\_ Освітня програма \_\_\_\_\_  
Системна інженерія \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ: \_\_\_\_\_ Зав.  
кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«19» травня 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачу \_\_\_\_\_ Грабару Петру Олександровичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Розроблення програмного забезпечення для симуляції промислового  
робота-маніпулятора

Затверджена наказом по університету від 19.05.2025 р. №391 Ст

2 Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 31.05.2025

3 Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Середовище розробки Webots

3.2 Мова програмування C

3.3 Програма для моделювання Fusion 360

---

4 Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

---

4.1 Вступ

---

4.2 Конструктивні особливості, класифікація і технічні показники промислових робіт

---

4.3 Практична реалізація симуляції моделювання інтегрованих технологіях

---

4.4 Вибір САД-середовища для проектування та розробки креслення

---

4.5 Інтеграція робота в реальне виробництво

---

4.6 Висновки та перелік джерел посилань

---

5 Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) 12 с. формату А4

---

6 Консультанти розділів роботи

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № |                                       | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1 | Аналіз технічного завдання            | 12.12.2024                     | Виконано |
| 2 | Розробка креслення 3-D моделі         | 10.01.2025                     | Виконано |
| 3 | Інтегрування 3-D моделі до середовища | 07.03.2025                     | Виконано |
| 4 | Тестування та перевірка 3-D моделі    | 20.03.2025                     | Виконано |
| 5 | Написання коду та симуляція           | 25.04.2025                     | Виконано |
| 6 | Закінчення практичної часті проєкту   | 17.05.2025                     | Виконано |
| 7 | Висновки та перелік джерел посилань   | 23.05.2025                     | Виконано |
| 8 | Оформлення пояснювальної записки      |                                |          |
|   |                                       |                                |          |
|   |                                       |                                |          |

Дата видачі завдання 15.11.2024

Здобувач

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Петро ГРАБАР  
(власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

ас. каф. КІТАР Роман СТРИЛЕЦЬ  
(посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 58с., 15 рис., 2 дод., 11 джерел.

### МОДЕЛЮВАННЯ, ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ, МАНІПУЛЯТОР, ПРОМИСЛОВИЙ МАНІПУЛЯТОР, WEBOTS, C, СИМУЛЯЦІЯ.

У кваліфікаційній роботі розглядається процес створення програмного забезпечення для симуляції промислового робота-маніпулятора. Основна мета проекту – розробити функціональну віртуальну модель, здатну відтворювати роботу реального маніпулятора в умовах, наближених до виробничих. Це дозволяє оцінити ефективність, точність та гнучкість майбутньої системи без необхідності створення фізичного прототипу.

Об'єкт розробки – процес розробки робота-маніпулятора.

Предмет розробки – програмне забезпечення для керування та симуляції роботи робота-маніпулятора.

У першому розділі здійснено аналіз технічного завдання, визначено вимоги до роботизованої системи, обґрунтовано вибір середовища розробки та мови програмування (Python, Webots, Fusion 360). Окрема увага приділена характеристикам промислових роботів і принципам побудови систем керування.

Другий розділ присвячено побудові 3-D-моделі маніпулятора, написанню коду для його управління, моделюванню алгоритмів руху та тестуванню в симуляційному середовищі Webots. Реалізовано функції захоплення об'єктів, точного позиціонування та базових сценаріїв взаємодії з віртуальними об'єктами.

У третьому розділі розглянуто можливості подальшої інтеграції симуляційної моделі у реальне виробництво. Наведено приклади апаратних і програмних засобів, необхідних для побудови повноцінної автоматизованої системи, а також виконано базове економічне обґрунтування розробки.

## ABSTRACT

Explanatory note: 58 pp., 15 fig., 2 app., 11 sources.

MODELING, INDUSTRIAL ROBOT, MANIPULATOR, INDUSTRIAL MANIPULATOR, WEBOTS, C, SIMULATION.

The thesis examines the process of creating software for simulating an industrial robot manipulator. The main goal of the project is to develop a functional virtual model capable of reproducing the operation of a real manipulator in conditions close to production. This allows evaluating the efficiency, accuracy, and flexibility of the future system without the need to create a physical prototype.

The first chapter analyzes the technical specifications, defines the requirements for the robotic system, and justifies the choice of development environment and programming language (Python, Webots, Fusion 360). Particular attention is paid to the characteristics of industrial robots and the principles of control system design.

The second chapter is devoted to building a 3-D model of the manipulator, writing code for its control, modeling motion algorithms, and testing in the Webots simulation environment. The functions of object capture, precise positioning, and basic scenarios of interaction with virtual objects have been implemented.

The third chapter discusses the possibilities for further integration of the simulation model into real production. Examples of hardware and software necessary for building a full-fledged automated system are given, and a basic economic justification for the development is provided.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Перелік умовних скорочень .....  | 8  |
| Вступ .....  | 9  |
| 1 Конструктивні особливості, класифікація і технічні показники промислових роботів ..... | 12 |
| 1.1 Структура та особливості промислових роботів.....                                    | 12 |
| 1.2 Характеристики та побудова маніпуляторів .....                                       | 16 |
| 1.3 Типи промислових маніпуляторів .....   | 18 |
| 2 Розробка 3-D моделі промислового робота-маніпулятора.....                              | 22 |
| 2.1 Обґрунтування вибору типу основного роботу .....                                     | 22 |
| 2.2 Переваги віртуального моделювання .....  | 25 |
| 2.3 Моделювання конструкції промислового робота .....                                    | 28 |
| 2.4 Сценарії використання моделі робота-маніпулятора .....                               | 34 |
| 3 Симуляція промислового робота .....  | 38 |
| 3.1 Інтегрування 3-D моделі до середовища Webots .....                                   | 38 |
| 3.2 Теорія автоматичного управління .....  | 44 |
| 3.3 Охорона праці .....  | 46 |
| Висновки .....   | 49 |
| Перелік посилань .....   | 51 |

|  |    |
|--|----|
|  | 9  |
| Додаток А Лістинг програми .....         | 53 |
| Додаток Б Демонстраційний матеріал ..... | 57 |

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ГВС – гнучкі виробничі системи;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ОМ – об’єкт маніпуляції;

ПР – промисловий робот;

РТК–робототехнічний комплекс;

САУ–системи автоматичного управління;

ШІ – штучний інтелект;

CAD–computer-aided design;

CAM –computer-aided manufacturing;

CAE –computer-aided engineering;

DLS–domain specific language;

MVP–minimum viable product;

PLS–programmable logic controller;

SCADA – supervisory control and data acquisition.

## ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості особливе місце посідає автоматизація виробничих процесів із використанням промислових роботів. Зростаюча потреба у підвищенні точності, продуктивності та зниженні людського впливу на виробництво сприяє активному впровадженню робототехнічних систем. Промислові роботи-маніпулятори, зокрема, дозволяють автоматизувати складні або небезпечні процеси, що значно покращує ефективність виробництва.

Метою даної роботи є розроблення програмного забезпечення для створення тривимірної моделі промислового робота-маніпулятора за допомогою САД-системи (Creo або Fusion 360), програмування його рухів із використанням мови Python або C та реалізація симуляції його функціонування в умовах, наближених до реального виробництва. Такий підхід дозволяє опанувати не лише інженерну складову проєктування механічних систем, а й програмну частину, що є невід'ємною складовою сучасної автоматизації.

Практична частина реалізується у кілька етапів: створення 3-D-моделі робота з урахуванням ступенів свободи, моделювання його руху, розробка алгоритмів управління та симуляція роботи за допомогою відповідного програмного забезпечення. На виході очікується працездатна віртуальна модель робота-маніпулятора, що здатна виконувати визначені команди у віртуальному середовищі.

Об'єкт дослідження – процес розробки робота-маніпулятора.

Предмет дослідження – програмне забезпечення для керування та симуляції роботи робота-маніпулятора.

У межах дипломної роботи було створено 3D-модель промислового маніпулятора з урахуванням його кінематичних обмежень, що дозволило точно

відобразити механіку руху пристрою. На основі побудованої моделі розроблено програму управління, яка забезпечує виконання заданих траєкторій руху.

Функціональність системи перевірялася шляхом проведення симуляції у віртуальному середовищі, що дало змогу імітувати реальні умови експлуатації. Після цього була виконана оцінка точності, ефективності та надійності створеної системи з метою виявлення її сильних сторін та потенційних напрямів для подальшого вдосконалення. Суттєвою перевагою створення і тестування роботів-маніпуляторів за допомогою комп'ютерних моделей є скорочення витрат та часу на розробку. Віртуальне моделювання дозволяє оперативно виявляти конструктивні недоліки, оптимізувати кінематичні та динамічні характеристики, а також налаштовувати системи керування без потреби виготовлення фізичних прототипів на початкових етапах. Такий підхід економить ресурси підприємства та значно прискорює впровадження нових технологій у виробництво.

Особливе значення має процес програмування маніпулятора. Сучасні роботизовані системи вимагають гнучких і ефективних алгоритмів управління, здатних адаптуватися до змінних умов виробничого середовища. Розроблена програма для керування рухами маніпулятора може бути масштабована та адаптована для різноманітних промислових задач: від точного складання електронних компонентів до операцій з важкими деталями у важкій промисловості.

Важливо зазначити, що навички, здобуті під час роботи над проектом, мають високий попит у сфері автоматизації та робототехніки. Володіння інструментами 3D моделювання, знання мов програмування та досвід роботи з платформами симуляції формують кваліфікованих фахівців, здатних розробляти та впроваджувати робототехнічні комплекси різного ступеня складності. Це не лише розширює професійні можливості випускників, але й дозволяє підприємствам ефективно інтегрувати передові технології. Подальший розвиток проекту може включати інтеграцію систем штучного інтелекту, що дасть змогу створити адаптивніші та інтелектуальніші роботи. Використання технологій машинного навчання дозволить роботам самостійно оптимізувати свої дії, аналізувати помилки та вносити необхідні коригування в режимі реального часу, що суттєво підвищить

їхню автономність та продуктивність. Окрім суто промислового використання, знання і досвід, отримані під час роботи, можуть бути використані у широкому спектрі інших напрямів. Зокрема, у сфері медицини, де точність рухів роботів може забезпечити нові стандарти хірургічних операцій, у сфері обслуговування та логістики, де роботи вже активно впроваджуються для виконання рутинних завдань [1].

Для досягнення поставленої мети у дипломній роботі необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технічні характеристики та конструктивні особливості промислових роботів-маніпуляторів;
- створити 3-D-модель робота в середовищі Fusion 360 з урахуванням кінематичних обмежень;
- реалізувати програмну частину управління рухом робота на мові програмування C;
- здійснити інтеграцію моделі в симуляційне середовище Webots;
- провести тестування та симуляцію виконання реальних виробничих завдань.

Отримані результати кваліфікаційної роботи можуть бути безпосередньо пов'язані з Цілями сталого розвитку, зокрема з Ціллю 9 «Індустріалізація, інновації та інфраструктура», яка реалізується через впровадження роботизованих рішень у виробничі процеси. Це сприяє оптимізації ресурсів, зниженню витрат та підвищенню ефективності виробництва завдяки інтелектуальним автоматизованим системам.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1] та керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [15] та методичними вказівками [16] здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія».

# 1 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ, КЛАСИФІКАЦІЯ І ТЕХНІЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

## 1.1 Структура та особливості промислових роботів

Промисловий робот – це автоматична програмно-керована машина, що імітує рухові й інтелектуальні функції людини під час виконання виробничих операцій. Він відноситься до класу технічних засобів, які призначені для автоматизації транспортних процесів та обслуговування технологічних операцій.

Такі роботи є ключовими компонентами автоматизованих гнучких виробничих систем (ГВС), що дозволяють значно підвищити ефективність виробництва. Зазвичай їх використовують для виконання завдань, таких як зварювання, фарбування, монтаж, сортування й переміщення деталей, пакування, контроль якості продукції та випробування. Усі зазначені операції роботи здійснюють із високою точністю, швидкістю та надійністю.

Промисловий робот (ПР) являє собою стаціонарну або мобільну автоматичну машину, яка включає виконавчий пристрій у формі маніпулятора з кількома ступенями рухливості та перепрограмувані пристрої програмного управління, які забезпечують рухові й керуючі функції у процесі виробництва.

Структура роботів-маніпуляторів складається з кількох ключових компонентів, які забезпечують їхню функціональність у виробничих операціях. Першим компонентом є механічна система (маніпулятор), що представляє собою сукупність механізмів, які імітують функції людських кінцівок, здебільшого руки, забезпечуючи переміщення об'єктів у просторі з високою точністю і повторюваністю. Маніпулятор включає базу, ланки, що з'єднані між собою шарнірами, та кінцевий ефектор, який виконує основні функції – захоплення, утримання або обробку деталей [1].

Другим важливим компонентом є система програмного керування, зазвичай заснована на електронно-обчислювальній машині (ЕОМ). Вона відповідає за управління рухами маніпулятора за заданими алгоритмами, забезпечує точне виконання послідовності дій та інтегрує робот у загальний виробничий процес.

Третій компонент – інформаційна система, що складається з сенсорів, датчиків і пристроїв зворотного зв'язку. Вона дозволяє роботу сприймати параметри навколишнього середовища, аналізувати їх та оперативно коригувати свої дії за потребою. В залежності від типу та рівня розвитку систем управління, промислові роботи поділяються на три покоління.

Перше покоління – це програмні роботи, які функціонують за жорстко встановленими програмами. Їх дії повністю визначаються заздалегідь створеними алгоритмами без можливості корекції поведінки залежно від ситуації. Такі роботи широко використовуються в машинобудуванні, переважно для виконання простих і повторюваних завдань, таких як точкове зварювання або транспортування деталей.

Друге покоління – адаптивні роботи, які функціонують за гнучкими програмами. Вони оснащені сенсорами і системами зворотного зв'язку, що дозволяє реагувати на зміни зовнішнього середовища. Такі роботи можуть автоматично пристосовувати свої дії, змінювати траєкторію руху чи параметри інструмента залежно від ситуації, що значно розширює сферу їх застосування.

Третє покоління – це інтелектуальні роботи з елементами штучного інтелекту. Вони здатні до самонавчання, ухвалення рішень, розпізнавання об'єктів і планування власних дій. Такі роботи активно досліджуються та впроваджуються у високотехнологічних виробництвах, роботизованій логістиці та сфері обслуговування [2].

За будовою робот-маніпулятор нагадує людську руку (антропоморфний). Він може мати декілька ступенів свободи, що відповідають за переміщення робочого органу робота у просторі. Найпоширенішою є конструкція з п'ятьма ступенями свободи.

Подібно до людини, він має плече, лікоть, зап'ясток і пальці (у цьому випадку двопальцевий захват). Така конструкція дає змогу роботу обертатися навколо своєї осі, захоплювати предмет, піднімати, повертати та переміщувати його в інше місце.

На сьогодні існує значна кількість компаній, які виготовляють промислові роботи. Завдяки цьому маємо численні варіанти конструкцій зі своїми перевагами й недоліками.

Найвідомішими компаніями-виробниками сучасних промислових маніпуляторів є KUKA, FANUC, BOSCH, KAWASAKI та MITSUBISHI ELECTRONIC [3].

За призначенням і класифікаційними ознаками роботи можуть бути поділені на кілька груп, з яких один із класів ПР у галузі машино- та приладобудування складають роботи, призначені для автоматизації технологічних процесів і операцій механічної обробки, складання, контролю та ін. Класифікаційна характеристика поділяє ПР за характером виконуваних операцій, ступенем спеціалізації, галуззю застосування.

Класифікація промислових роботів (ПР) є важливим інструментом для вибору відповідної конструкції та функціональності під конкретні виробничі завдання. Вона дозволяє оптимізувати використання ПР у різних умовах експлуатації, забезпечуючи ефективність, точність та надійність автоматизованих систем. Згідно з поділом за характером виконуваних операцій, розрізняють роботи: вантажно-розвантажувальні, технологічні, допоміжні та універсальні. Технологічні ПР, у свою чергу, можуть бути призначені для зварювання, механічної обробки, нанесення покриттів, обслуговування верстатів тощо.

Важливою класифікаційною ознакою є також число ступенів рухомості (ступенів свободи), яке визначає здатність ПР до просторового позиціонування робочого органу. Роботи з трьома ступенями використовуються переважно для простих маніпуляцій, тоді як роботи з шістьма або більше ступенями рухомості здатні виконувати складні просторові траєкторії, наприклад, у зварюванні чи монтажі. Класифікацію ПР за характером виконуваних операцій, ступенем

спеціалізації, галузю застосування, числом ступенів рухомості та іншими ознаками зображено на рисунку 2.2.

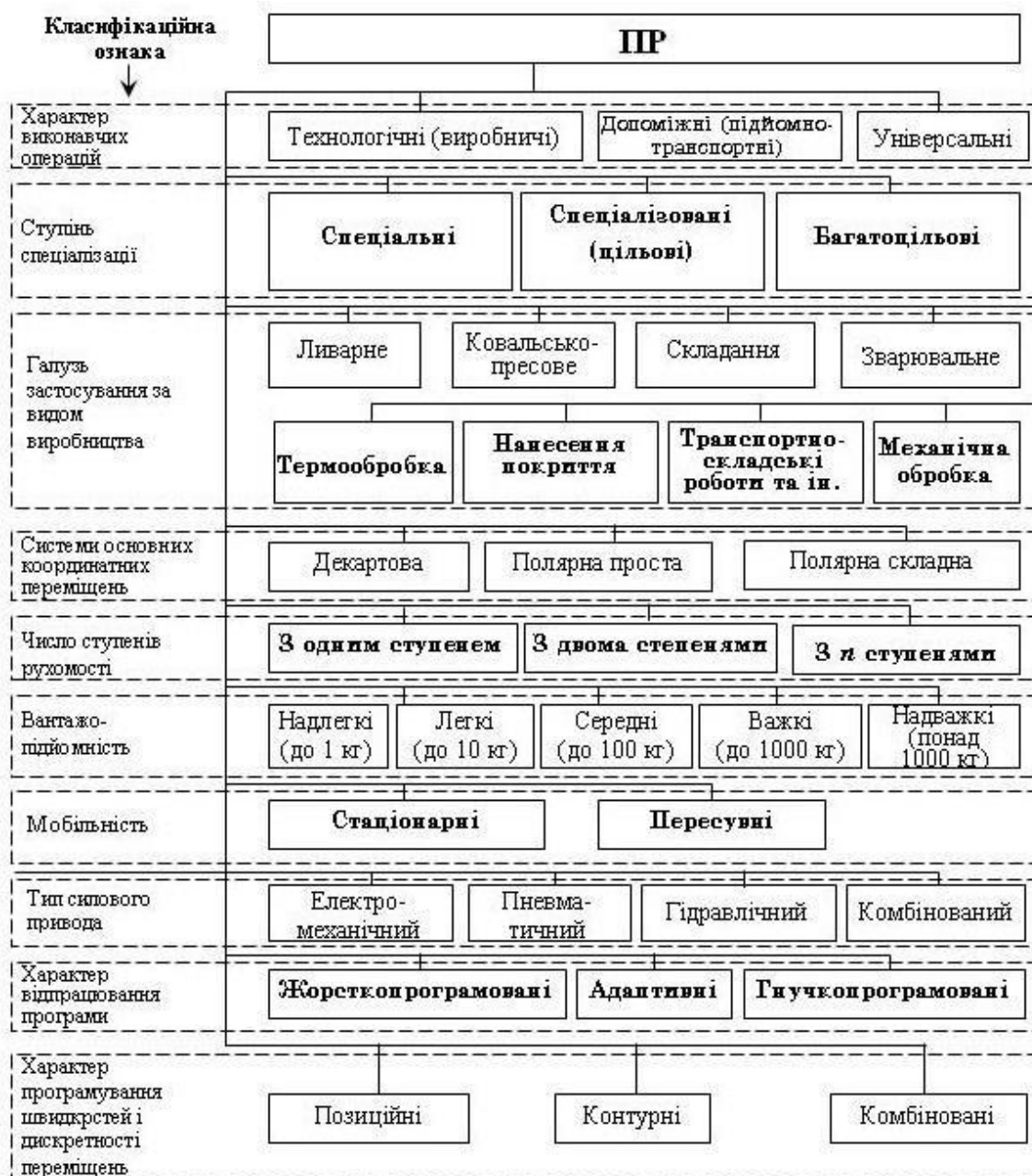


Рисунок 2.2 – Класифікація промислових роботів

Основні технічні показники промислових роботів (ІР) визначаються відповідно до галузі їх застосування та специфіки виробничих процесів, для яких ці роботи призначені. Саме тому всі функціональні, конструктивні й експлуатаційні характеристики ІР мають бути тісно пов'язані з параметрами інших компонентів виробничої системи. Така взаємодія забезпечує ефективну роботу в межах

робототехнічного комплексу (РТК) і вимагає чіткого розуміння ключових характеристик [4].

## 1.2 Характеристики та побудова маніпуляторів

Функціональні характеристики ПР охоплюють кількість, тип і взаємне розташування ступенів рухливості; кількість точок позиціювання та діапазон їх розташування для кожного ступеня; форму, розміри та конфігурацію робочої зони – простору, де може перебувати кінцевий робочий орган робота. До функціональних параметрів також належать: кількість і тип команд, що підтримуються програмним забезпеченням; характеристики каналів зв'язку системи управління із зовнішніми пристроями; вантажопідйомність; можливі технологічні зусилля на робочих органах; діапазони швидкостей та прискорень; точність позиціювання; здатність адаптуватися до похибок у розташуванні, формі та масі об'єктів маніпуляції (ОМ). Ці характеристики визначають точність, швидкість та ефективність виконання завдань роботом [4].

Конструктивні характеристики відображають фізичні та інженерні особливості ПР: спосіб встановлення (підлоговий, настільний, порталний, інтегрований у виробничу лінію тощо); розміри, форму й конфігурацію робочого простору, доступного для руху конструктивних елементів; способи й діапазони регулювання положень ступенів рухливості; систематичні та випадкові похибки позиціювання; максимально допустимі прискорення під час запуску й зупинки; жорсткість конструкції, власні коливальні частоти, коефіцієнти затухання, масу й габарити. Ці характеристики впливають на стабільність, точність і продуктивність у реальних умовах роботи.

Експлуатаційні характеристики включають параметри, що визначають умови та зручність використання ПР. До них належать: форма й розташування зони обслуговування (простору фактичного виконання робіт); показники надійності, довговічності й ремонтпридатності; час переналаштування на нові режими або об'єкти; джерела живлення й енергоспоживання; вимоги безпеки (вибухо- та

пожежобезпека); витрати на утримання; умови експлуатації (температура, вологість, запиленість). Ці параметри важливі для оцінки загальної ефективності застосування ПР у виробничому процесі [5].

До основних технічних показників ПР також належить робоча зона маніпулятора – визначається як простір, у межах якого він може вільно переміщуватися та виконувати задані дії. Конструктивна схема промислового робота включає такі параметри, як кількість ступенів свободи, габарити, форма, а також тип захватного пристрою чи інструмента, що безпосередньо впливають на його функціональність. Траєкторія руху робочого органу визначає ефективність виконання операцій і тісно пов'язана зі швидкістю переміщення окремих ланок, яка, у свою чергу, залежить від точності та плавності рухів. Важливим параметром є вантажопідйомність, тобто максимальна маса об'єкта, яку робот здатен переміщувати без втрати точності. Гнучкість системи задається кількістю ступенів рухливості, що визначає можливості маніпулятора здійснювати рухи в різних напрямках. Тип приводу, обраний для забезпечення рухів, має відповідати необхідним вимогам до навантаження, точності та характеру виконуваних задач. Нарешті, захватний пристрій є основним елементом взаємодії робота з об'єктами й підбирається з урахуванням форми, матеріалу та функцій, які повинен виконувати маніпулятор у конкретному виробничому процесі. Вибір технічних характеристик залежить від специфіки завдань, що виконуються, а також розміру й форми робочої зони. ПР можуть мати різні конструкції й працювати в різних системах координат (декартова, циліндрична, сферична).

Сьогодні роботи-маніпулятори широко використовуються в сучасних виробництвах, від важкого машинобудування до електроніки й фармацевтики, виконуючи як основні технологічні операції (зварювання, свердління, складання), так і допоміжні функції (переміщення деталей, пакування, сортування).

Залежно від рівня управлінської гнучкості роботи поділяються на чотири категорії: жорстко-програмовані, гнучкі, адаптивні й інтелектуальні, останні з яких можуть самостійно аналізувати умови роботи й оптимізувати процеси.

Важливим елементом є захватний пристрій (ЗП), що забезпечує взаємодію з об'єктами. Він буває механічним, вакуумним чи магнітним, обирається відповідно до завдань і характеристик матеріалів. Сучасна тенденція розвитку ПР орієнтована на створення універсальних, адаптивних систем із високою автономністю завдяки інтеграції сенсорних технологій і штучного інтелекту [5].

### 1.3 Типи промислових маніпуляторів

Промислові роботи-маніпулятори поділяються на типи щодо їхнього способу управління, призначення, спеціалізації тощо. Управління рухом за окремими ступенями рухливості може здійснюватися у двох формах: безперервне (контурне) та дискретне (позиційне). При дискретному способі управління рух відбувається шляхом послідовного переміщення по задалегідь визначених точках. Найпростішим типом такого управління є циклове, де кількість позиційних точок для кожної ступені рухливості мінімальна – зазвичай лише початкова і кінцева координати.

Залежно від типу керування, роботи поділяються на три основні категорії. Першу групу становлять роботи з програмним керуванням, які виконують дії відповідно до задалегідь визначеної програми без можливості змінювати поведінку під час роботи – такі системи відносяться до першого покоління. Другу групу складають роботи з адаптивним керуванням, які мають певну гнучкість у діях і здатні частково реагувати на зміни у середовищі, коригуючи свою поведінку в межах заданих алгоритмів – це роботи другого покоління. Третю групу представляють інтелектуальні роботи, що базуються на використанні штучного інтелекту; вони можуть аналізувати ситуацію, приймати рішення самостійно та навчатися під час роботи, що характерно для роботів третього покоління [6].

Щодо призначення, роботи можна розділити на групи, з яких найбільша – промислові роботи, призначені для автоматизації процесів машинобудування.

У галузі машинобудування промислові роботи класифікуються відповідно до типу виконуваних виробничих операцій. Зокрема, зварювальні роботи застосовуються для автоматизації зварювальних процесів, забезпечуючи високу точність і повторюваність швів. Складальні роботи призначені для виконання операцій зі збирання виробів, що дозволяє зменшити людську участь у рутинних і точних задачах. Роботи, задіяні у процесах механічної обробки, забезпечують стабільну якість при виконанні токарних, фрезерних та інших подібних операцій. Ливарні системи автоматизують процеси заливання металу у форми та сприяють безпечному виконанню таких технологічно складних операцій. Нарешті, пресові роботи використовуються для автоматизації штампувальних процесів, що дозволяє значно підвищити продуктивність і зменшити навантаження на персонал.

Промислові роботи, незалежно від їх функціонального призначення, класифікуються за низкою ознак, що дозволяють комплексно оцінити їх технічні характеристики та сферу застосування. Залежно від призначення, розрізняють три основні типи роботів. Універсальні (багатоцільові) роботи призначені для виконання широкого спектра операцій і здатні функціонувати спільно з різними видами технологічного обладнання. Спеціалізовані (цільові) роботи мають більш вузьке функціональне спрямування та, як правило, виконують одну визначену операцію – наприклад, зварювання, фарбування або обслуговування певного типу машин. Спеціальні роботи створюються для виконання однієї конкретної задачі, найчастіше – обслуговування конкретної моделі обладнання.

За характером виконуваних операцій промислові роботи поділяються на виробничі (технологічні), які безпосередньо здійснюють основні процеси виготовлення продукції (наприклад, зварювання, складання), підйомнотранспортні, що виконують допоміжні функції, пов'язані з переміщенням предметів, а також універсальні, здатні поєднувати як основні, так і допоміжні технологічні дії.

Критерій типу приводу передбачає поділ роботів на електричні, гідравлічні, пневматичні та пневмо-гідравлічні. Найбільш поширеними є електричні роботи, що характеризуються високою точністю і зручністю керування. Гідравлічні системи

забезпечують значну потужність і застосовуються у випадках підвищених навантажень. Пневматичні приводи вирізняються високою швидкістю, однак мають меншу точність, тоді як пневмо-гідролічні конструкції поєднують властивості обох типів.

Ще одним важливим параметром є вантажопідйомність, що визначається можливостями маніпуляторів робота. За цим критерієм розрізняють надлегкі (до 1 кг), легкі (до 10 кг), середні (до 100 кг), важкі (до 1000 кг) та надважкі (понад 1000 кг) моделі. У разі наявності кількох маніпуляторів вантажопідйомність визначається за найбільш потужним з них [6].

За кількістю маніпуляторів роботи можуть бути одноманіпуляторними (однорукими), а також двохрукими, трьохрукими або чотирирукими. Відповідна класифікація відображає функціональну складність системи та її здатність до одночасного виконання кількох операцій.

Одними з ключових характеристик є швидкість і точність рухів, що визначають динамічні властивості роботизованих систем. За швидкістю роботи поділяють на три групи: з малою швидкістю (до 0,5 м/с), середньою (понад 0,5 до 1 м/с) та високою (понад 1 м/с). Переважна більшість сучасних моделей має середню швидкість, тоді як лише близько 20% демонструють високі значення. Водночас існує суперечність між підвищенням швидкості та збереженням високої точності, що ускладнює технічну реалізацію швидкісних систем.

Точність позиціонування маніпулятора визначається або похибкою при дискретному русі, або здатністю точно відтворювати задану траєкторію при безперервному русі. Залежно від лінійної похибки точність класифікується як мала (від 1 мм і більше), середня (від 0,1 до 1 мм) та висока (менше 0,1 мм). Цей параметр має особливе значення у високоточному виробництві.

Число ступенів рухливості описує кількість незалежних координатних переміщень маніпулятора відносно опорної системи. Воно безпосередньо впливає на маневреність та функціональну гнучкість робота [6].

Останнім класифікаційним критерієм є спосіб розміщення роботизованої системи. Роботи можуть бути стаціонарними або рухомими (пересувними). За розташуванням у просторі розрізняють підлогові, підвісні (переміщуються по підвищених рейкових системах) та вбудовані в інше обладнання (наприклад, інтегровані у верстати, які вони обслуговують). Такий поділ забезпечує оптимальне розміщення роботів у виробничому середовищі відповідно до конкретних технологічних потреб.

## 2 РОЗРОБКА 3-D МОДЕЛІ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТАМАНІПУЛЯТОРА

### 2.1 Обґрунтування вибору типу основного роботу

На сучасному ринку промислової автоматизації існує низка високотехнологічних рішень, які вже тривалий час застосовуються в галузях машинобудування, електроніки, логістики та автомобілебудування. Серед найвідоміших виробників промислових маніпуляторів і роботизованих систем виділяються такі компанії, як KUKA (Німеччина), ABB (Швейцарія/Швеція), FANUC (Японія) та YASKAWA (Японія). Ці компанії пропонують готові інтегровані рішення, які поєднують високоточну механіку, адаптивне програмне забезпечення, інтерфейси управління та систему зворотного зв'язку на основі сенсорики та ШІ. Приклад роботу-маніпулятора одного з найпопулярніших конкурентів KUKA зазначено на рисунку 2.1.



## Рисунок 2.1 – Робот-маніпулятор KUKA

Для порівняння, віртуальна система, реалізована у межах даної роботи, надає функціонал базового управління маніпулятором з використанням інструментів симуляції (Webots, Python/C API, CAD-середовище). Вона забезпечує можливість тестування кінематичних алгоритмів, базової логіки захоплення об'єктів, імітації траєкторій, але не включає повноцінної інтеграції з реальними датчиками та PLC-контролерами у фізичному середовищі. На відміну від цього, роботи KUKA серії KR AGILUS підтримують повноцінну співпрацю з KUKA. WorkVisual, KUKA.Sim та мають вбудовану систему управління KRC, яка здатна працювати у режимі реального часу з точністю позиціонування до 0,03 мм.

ABB Robotics пропонує роботів серії IRB, які можуть бути інтегровані в цифрову екосистему RobotStudio – потужне середовище моделювання з підтримкою цифрових двійників, реального коду RAPID, оптимізації траєкторій та аналізу навантаження. Аналогічно, FANUC забезпечує інтеграцію з платформою ROBOGUIDE, що дозволяє не лише симулювати поведінку робота, а й генерувати програми для завантаження на фізичні контролери без потреби дублювання коду. Зокрема, відкритість інструментів Webots і Python дозволяє вільно змінювати архітектуру системи, інтегрувати сторонні бібліотеки (наприклад, OpenCV, TensorFlow), розгорнути симуляції на бюджетних комп'ютерах без потреби в дорогому ліцензійному ПЗ. Це робить розробку більш доступною для освітніх установ, стартапів і невеликих R&D-проектів.

Водночас, однією з основних недоліків системи є обмеженість у масштабованості та відповідності міжнародним стандартам (ISO 10218-1, ISO/TS 15066), а також відсутність апаратної підтримки контролю безпеки (наприклад, emergency stop, safe torque off, safe speed). Крім того, система не має сертифікації для роботи в промисловому середовищі, а також не підтримує стандартні промислові протоколи (Profinet, EtherCAT, OPC UA), що обмежує її використання на реальних заводах [9].

В даній роботі як прототип було обрано модель робота-маніпулятора ABB IRB 120, зображений на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Робот-маніпулятор ABB IRB 120

Робот-маніпулятор ABB IRB 120 є представником легких шестивісних промислових роботів, розроблених для високоточних маніпуляцій у обмежених просторах. Його вибір для моделювання був обумовлений компактними габаритами, універсальністю кінематичної схеми та добре задокументованими технічними характеристиками, що робить його зручним як для досліджень, так і для розробки власних маніпуляційних систем у навчальних або R&D-завданнях. Його конструкція стала типовою для роботів такого класу, тому він виступає логічною базою для CAD-моделювання або симуляцій.

Однією з ключових переваг IRB 120 перед конкурентами, зокрема такими як UR5 (Universal Robots) або Fanuc LR Mate 200iD, є точність та жорсткість конструкції. Робот має повторюваність  $\pm 0,01$  мм, що робить його придатним для завдань мікромонтажу, лазерного зварювання або точного дозування. Завдяки відносно невеликій власній масі (25 кг) при вантажопідйомності до 3 кг, IRB 120

здатен виконувати завдання з високою динамікою, без значного навантаження на несучу конструкцію. Його робоча зона сягає 580 мм, що є оптимальним значенням для настільних виробничих застосувань.

Конструктивно ABB IRB 120 має шестиланкову кінематичну структуру з відкритою кінематикою типу R–R–R–R–R–R, що забезпечує повну гнучкість у просторовому позиціонуванні ефектора. Всі осі оснащені сервоприводами, інтегрованими в корпус кожного сегмента. Передача обертання виконується через гармонічні або планетарні редуктори, що знижують люфт та забезпечують плавний рух. В середині основного корпусу розташовані енкодери високої роздільності, що дозволяють точно відслідковувати кутове положення кожного суглоба в режимі реального часу.

Енергопостачання та сигнальні канали реалізовані через внутрішні порожнини маніпулятора, що зменшує ризик механічного пошкодження кабелів та дозволяє розміщувати інструменти на фланці без складних зовнішніх підключень. Крім того, фланець IRB 120 є стандартом ISO 9409-1, що дозволяє легко інтегрувати захоплювачі, сенсори або інші виконавчі пристрої. З огляду на це, IRB 120 добре підходить як для серійної роботи в умовах автоматизованого виробництва, так і для експериментального середовища, де важлива гнучкість конфігурації.

Моделювання ABB IRB 120 у CAD-середовищі також обґрунтоване наявністю відкритих 3-D-моделей, документації та симуляційних пакетів, сумісних із такими системами як RoboDK, ROS, MATLAB Simulink, що дозволяє легко адаптувати модель до власних сценаріїв, використовуючи як інженерні, так і програмні інструменти.

## 2.2 Переваги віртуального моделювання

Віртуалізація – це створення віртуального, тобто штучного, об'єкта чи середовища.

Моделювання – це процес створення та дослідження моделі, яка представляє певний об'єкт, процес або явище. Модель може бути фізичною, графічною, математичною, або комп'ютерною.

3D моделювання(або віртуальне моделювання) – це процес створення тривимірних об'єктів та сцен, які можуть бути візуалізовані та використані в різних галузях. Воно знаходить широке застосування в архітектурі, ігровій індустрії, анімації, рекламі, медіа, медицині та багатьох інших сферах, де важливим є створення реалістичних і деталізованих візуальних образів. Моделювання є невід'ємною складовою сучасних наукових досліджень та інженерної практики. Воно дозволяє створювати абстрактні представлення реальних або уявних систем, що полегшує їхнє вивчення, аналіз та оптимізацію. Завдяки моделюванню можна прогнозувати поведінку складних процесів без необхідності втручання у реальні об'єкти, що особливо важливо у випадках із високим ризиком або великими витратами [7].

Однією з основних переваг моделювання є можливість проведення численних експериментів у віртуальному середовищі. Це суттєво знижує витрати часу та ресурсів порівняно з експериментами в реальному світі. Моделювання також дозволяє варіювати параметри системи в широких межах, що відкриває нові можливості для глибшого розуміння взаємозв'язків між змінними та їхнього впливу на результати.

Крім економічних переваг, моделювання сприяє підвищенню точності прогнозування та прийняття рішень. У багатьох галузях, зокрема у метеорології, економіці, медицині та екології, моделі використовуються для передбачення майбутніх подій та розробки стратегій реагування. Це забезпечує науково обґрунтований підхід до управління ризиками та планування.

Ще однією перевагою моделювання є можливість навчання та підвищення кваліфікації спеціалістів без шкоди для реальних об'єктів. Навчальні симулятори у військовій, авіаційній та медичній сферах дають змогу відпрацьовувати навички у

безпечному середовищі. Це особливо важливо там, де помилки можуть мати критичні наслідки [14].

Нарешті, моделювання слугує потужним інструментом для інновацій. Воно дозволяє створювати і тестувати нові ідеї ще до їхньої реалізації, знижуючи ризики невдач. У поєднанні з сучасними обчислювальними технологіями моделювання забезпечує швидкий і ефективний перехід від концепції до практичного застосування, сприяючи сталому розвитку науки й техніки [7].

У сфері інженерії, моделювання є ключовим інструментом для розробки, тестування та вдосконалення технічних систем ще на етапі їхнього проектування. Воно дає змогу створювати віртуальні прототипи конструкцій, аналізувати механічні навантаження, теплові процеси, динаміку систем, а також оцінювати ефективність і надійність інженерних рішень. Застосування моделювання значно скорочує час розробки та зменшує витрати на фізичне тестування, забезпечуючи при цьому високий рівень точності прогнозів. Такі інструменти, як метод скінченних елементів (FEM) або багатofізичне моделювання, стали стандартом у машинобудуванні, авіації, енергетиці та інших галузях [7].

У контексті моделювання промислових роботів воно відіграє критичну роль у проектуванні, програмуванні та оптимізації роботизованих систем. Завдяки комп'ютерному моделюванню можна з високою точністю імітувати кінематику, динаміку та траєкторії руху роботів у виробничому середовищі. Це дає змогу визначити оптимальні конфігурації, запобігти зіткненням і зменшити прості обладнання. Крім того, моделювання дозволяє тестувати алгоритми управління та адаптації роботів до змінних умов без необхідності втручання в реальне виробництво. У підсумку, це сприяє підвищенню продуктивності, гнучкості та безпеки автоматизованих систем.

Симуляція – це процес імітації поведінки реальної або гіпотетичної системи з метою її дослідження в різноманітних умовах без втручання в саму систему. Вона ґрунтується на математичних або комп'ютерних моделях, які відтворюють основні характеристики об'єкта, процесу або явища. Симуляція дозволяє відстежити динаміку системи у часі, оцінити вплив різних факторів та перевірити можливі

сценарії розвитку подій. На відміну від суто аналітичного підходу, симуляція надає змогу враховувати складну взаємодію численних змінних та непередбачуваних обставин [6].

У промисловості симуляція має особливу цінність як інструмент планування, оптимізації та підвищення ефективності виробничих процесів. Вона широко застосовується для моделювання потоків матеріалів, логістичних систем, роботи автоматизованих ліній і взаємодії між технологічними операціями. Завдяки симуляції підприємства можуть виявляти вузькі місця у виробництві, оцінювати наслідки змін у графіках або конфігураціях обладнання, а також мінімізувати ризики під час впровадження нових технологій. У результаті це сприяє прийняттю обґрунтованих рішень, зменшенню витрат та підвищенню конкурентоспроможності на ринку [13].

### 2.3 Моделювання конструкції промислового робота

Для практичної реалізації моделі промислового робота-маніпулятора було створено комплекс креслень, що включає загальний вигляд пристрою, його кінематичну структуру та габаритні розміри, а також окремі деталі з точними посадковими параметрами.

На першому кресленні представлено загальний вигляд маніпулятора у трьох проєкціях: зверху, спереду та збоку. Креслення наочно ілюструє робочу зону маніпулятора з радіусом дії до 712 мм, що визначає максимальну відстань, на яку він здатен дістатися для захоплення об'єкта. Також на ньому відображені основні кути обертання суглобів, які становлять  $100^\circ$ ,  $135^\circ$  та  $170^\circ$  відповідно – ці параметри враховуються під час обмеження руху в симуляційному середовищі для забезпечення коректної поведінки моделі. Окрім того, креслення містить інформацію про вісь повороту платформи та межі охоплення руки, що є важливими для програмування допустимих траєкторій і уникнення конфліктів у русі (рис. 2.3).

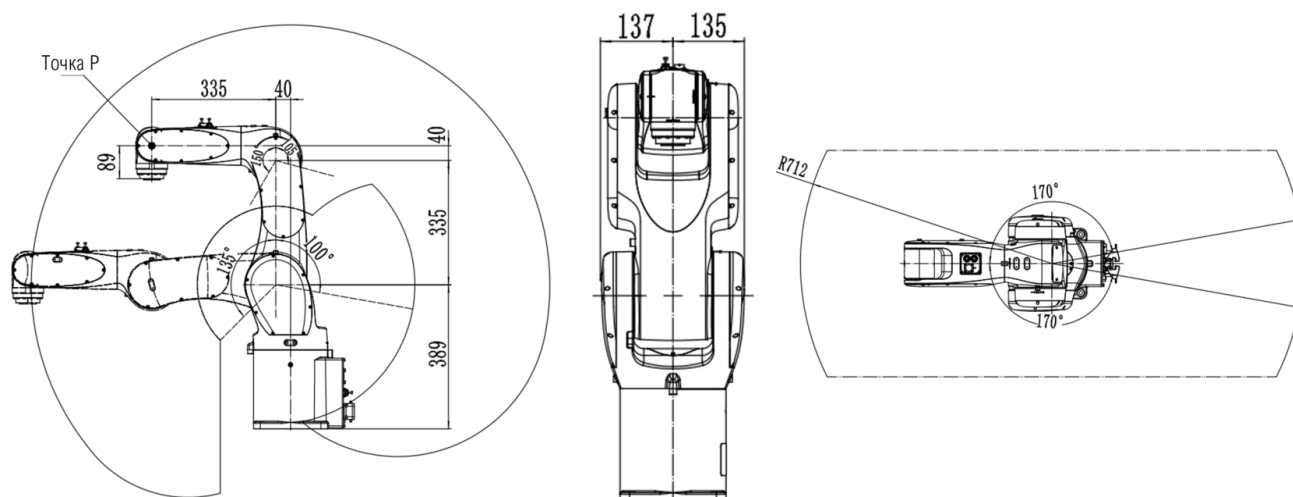


Рисунок 2.3 – Основні три проекції робота

Також вказано точку Р-умовну робочу точку (Tool Center Point), яка є ключовою для побудови системи координат руху кінцевого ефектора. Значення довжин ланок (наприклад, 335 мм, 389 мм) дозволяють точно задати геометричні параметри у CAD-моделі [8].

На другому кресленні (рис. 2.4) представлено фланцевий елемент, який слугує основою для кріплення приводу або редуктора. У конструкції вказані діаметри посадочних отворів  $\varnothing 65h7$  та  $\varnothing 45h7$  із відповідними допусками, що забезпечує точне й надійне з'єднання з приводною частиною. Крім того, передбачено отвори з різьбою М4 та М5 для фіксації, а також фаски й спеціальні отвори для встановлення направляючих штифтів, що сприяє точному позиціонуванню елемента. Отвори розміщені під кутом  $30^\circ$ , що дозволяє рівномірно розподіляти навантаження по всій площині з'єднання.

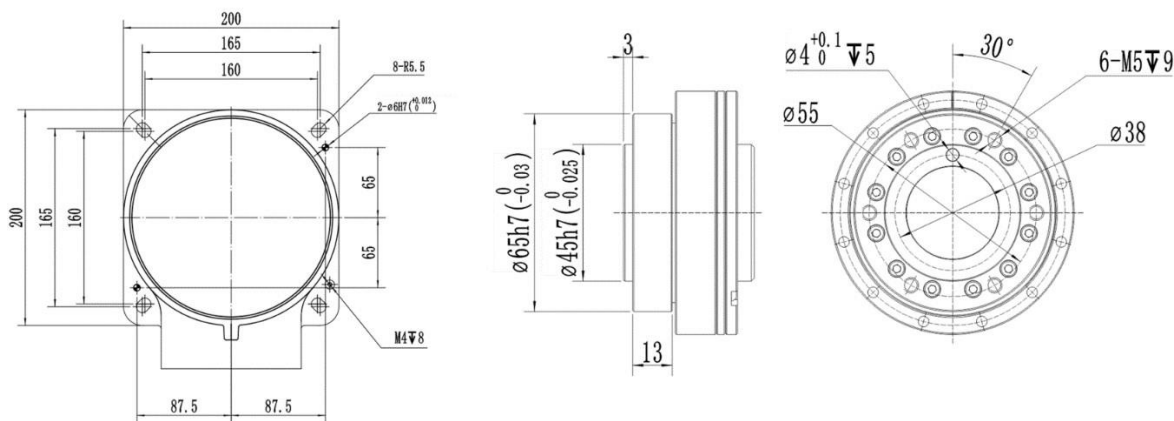


Рисунок 2.4 – Фланцевий елемента та база кріплення

Наявність таких креслень значно полегшує 3D -моделювання та програмну реалізацію, дозволяє забезпечити точну відповідність між віртуальною та потенційною фізичною моделлю.

На етапі проектування моделі промислового робота-маніпулятора було обрано середовище комп'ютерного моделювання Fusion 360. Fusion 360 – це комплексний хмарний CAD/CAE/CAM інструмент для промислового дизайну та машинобудівного проектування. Він поєднує в собі найкраще, що можна було взяти від Inventor, Alias, Simulation та інших програмних продуктів Autodesk, щоб створити унікальне середовище, яке з легкістю можна пристосувати під себе. Це середовище забезпечує високий рівень деталізації та дозволяє ефективно моделювати складні механічні конструкції з урахуванням кінематичних обмежень.

Під час розробки 3-D-моделі були враховані такі елементи: основа, обертові з'єднання, шарніри та захватний пристрій. Модель побудована з урахуванням п'яти ступенів свободи, що дозволяє забезпечити повноцінне тривимірне позиціонування та маніпуляцію об'єктами [8].

Проектування розпочато з моделювання основних функціональних компонентів маніпулятора, після чого відбулася поетапна збірка в остаточну конструкцію. Спершу було змодельовано нижню опорну частину, що виконує роль основи для фіксації робота на робочій поверхні. Вона містить фланець з отворами

під кріплення та роз'єми для електроживлення і сигналів керування. Основна геометрія отримана шляхом побудови базового ескізу, екструзії тіла та подальшої деталізації за допомогою фасок, отворів і вирізів(рис. 2.4).

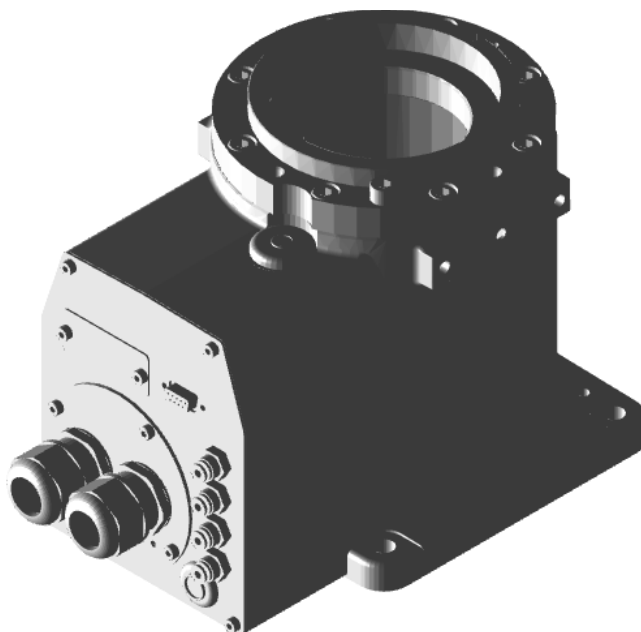
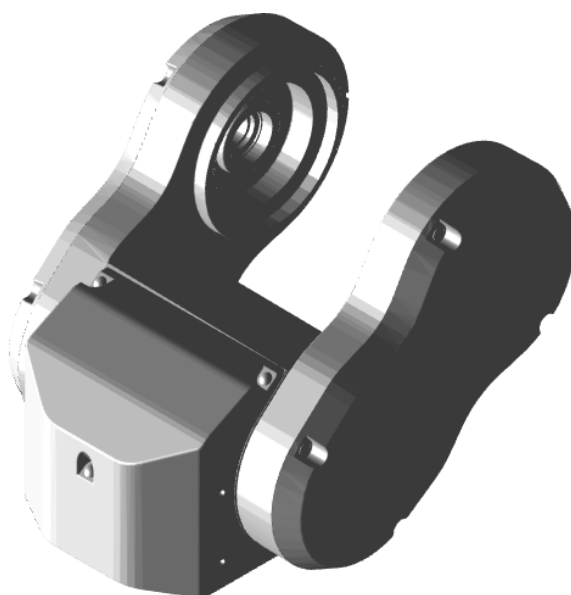


Рисунок 2.4 – Опора маніпулятора

Потім було побудовано другий сегмент – плечовий вузол, що містить в собі обертовий механізм. Геометрія була сформована шляхом об'єднання кількох об'ємних тіл із симетрично розміщеними отворами під вали та підшипники (рис. 2.5).



### Рисунок 2.5 – Плечовий вузол маніпулятора

Наступним етапом стало створення ліктьового модуля, який з'єднує середню частину маніпулятора. Цей елемент змодельований із двох бічних опор, з'єднаних центральною рамою. В процесі моделювання використовувалися операції «Revolve», «Shell» і «Cut Extrude» для формування посадочних отворів та каналів (рис. 2.6).

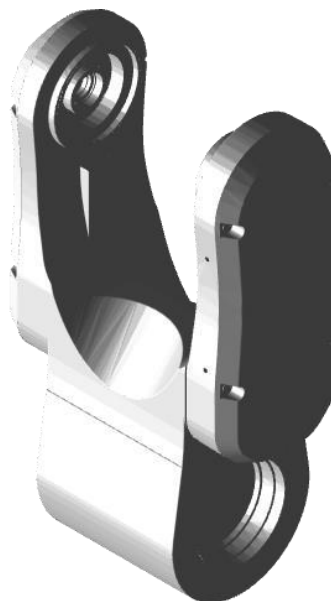


Рисунок 2.6 – Ліктьовий модуль маніпулятора

Після цього розроблено граничний блок обертання, який виконує функцію переходу до наступного ступеня свободи. Його особливістю є точна підгонка роз'ємних частин для подальшої анімації або зборки (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Гранний блок обертання маніпулятора

Окремо були створені елементи зчеплення – кріплення або обертальні вузли, що дозволяють передавати крутний момент між частинами (рис. 2.8).

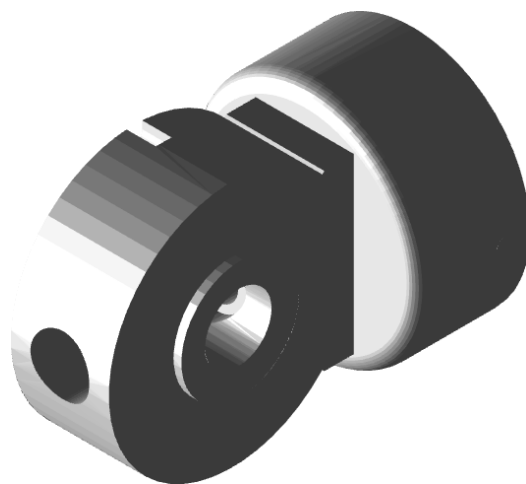


Рисунок 2.8 – Кріплення маніпулятора

Додаткові допоміжні деталі, такі як круглі пластини з отворами для з'єднання, змодельовані на основі параметричних ескізів з подальшою екструзією та шаблонами отворів (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Пластина на з'єднання

Завершальним етапом стало об'єднання всіх компонентів в єдину збірку. Для цього було створено асемблію, де кожна деталь точно позиціонувалась за допомогою обмежень типу Coincident і Distance (рис. 2.10).

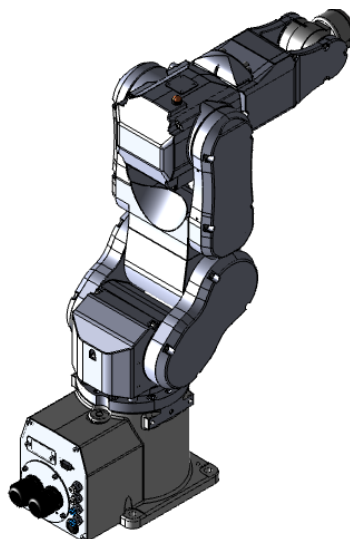


Рисунок 2.10 – Фінальне об'єднання всіх деталей

Фінальний вигляд моделі демонструє повністю функціональний роботизований маніпулятор, готовий до інтеграції в промислове середовище. Усі елементи створені з урахуванням допусків, механічної сумісності та реалістичного функціонування, що дозволяє використовувати модель для симуляцій, кінематичного аналізу або підготовки до виготовлення.

#### 2.4 Сценарії використання моделі робота-маніпулятора

Розроблена віртуальна модель промислового робота-маніпулятора має широкі можливості для застосування в освітньому, дослідницькому та виробничому середовищі. Одним із базових сценаріїв є використання моделі як навчального інструменту для ознайомлення студентів з основами робототехніки та автоматизації. Завдяки імітації поведінки механічної системи, користувачі можуть наочно вивчати принципи кінематики, динаміки та керування роботизованими системами без необхідності мати доступ до фізичного обладнання.

Ще одним поширеним сценарієм є тестування алгоритмів керування та оптимізації рухів у віртуальному середовищі. Це дає змогу моделювати різні виробничі ситуації, наприклад, подачу деталей на конвеєрну лінію з урахуванням обмежень у просторі, наявності перешкод або зміни траєкторії руху. Зокрема, у

рамках симуляції можливо реалізувати сценарій виявлення об'єктів за допомогою інфрачервоних датчиків та адаптацію поведінки маніпулятора у разі зміни зовнішніх умов [9].

Модель також може застосовуватись для розробки і перевірки інтерактивних інтерфейсів взаємодії оператора з автоматизованою системою. Наприклад, реалізація віртуальної панелі керування з кнопками, повзунками або сенсорним введенням дозволяє тестувати ергономічність та зручність майбутніх НМІ-рішень (Human-Machine Interface) ще до їх апаратного втілення. Це особливо актуально для підприємств, які прагнуть модернізувати виробничі лінії із залученням операторів.

Окрім того, розроблена симуляційна система може використовуватися для попереднього моделювання роботи роботів у нових виробничих осередках. За допомогою віртуального тестування можливе визначення ефективного розташування обладнання, оптимізація простору, а також оцінка можливих колізійних ситуацій до впровадження фізичних змін на виробництві. Це дозволяє зменшити витрати на експериментальні макети, знизити ризики помилок та пришвидшити цикл впровадження нових технологічних рішень [9].

Крім зменшення витрат та прискорення впровадження, симуляційна система також сприяє підвищенню безпеки виробництва. Завдяки детальному аналізу траєкторій руху роботів і прогнозуванню потенційних небезпечних ситуацій, можна заздалегідь внести корективи у розміщення або програмне забезпечення роботизованих елементів. Це знижує ймовірність зіткнень, аварій та простоїв.

Окрім цього, система дозволяє тестувати різні сценарії роботи без зупинки реального виробництва. Наприклад, можна змоделювати зміну конфігурації робочих осередків або впровадження нового обладнання й одразу оцінити його вплив на продуктивність. Це дає змогу приймати обґрунтовані рішення на основі даних і симуляцій, а не на припущеннях. На рисунку 2.11 зображено, як можна використовувати робота-маніпулятора в промисловості.

## Основні сценарії використання моделі робота-маніпулятора

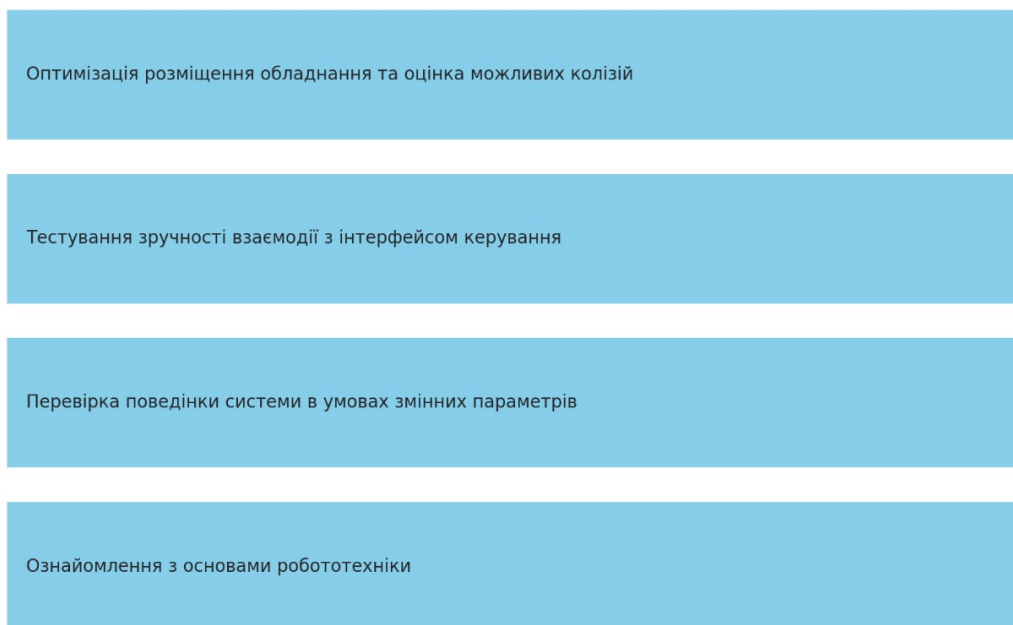


Рисунок 2.11 – Основні сценарії використання

У данній роботі розглядається використання шестивісного промислового маніпулятора, зображеного на кресленні, для точної автоматизованої операції переміщення готових виробів з виробничої лінії до тари для пакування (наприклад, картонної коробки). Такий маніпулятор може бути інтегрований у виробничий процес для підвищення ефективності, зменшення впливу людського чинника та забезпечення повторюваності дій з високою точністю.

У базовій конфігурації маніпулятор оснащується електроприводами на всіх ступенях свободи, що дозволяє йому виконувати складні траєкторії руху та адаптуватися до змін у розташуванні об'єктів. Основна задача – після завершення виробничого циклу захопити готовий виріб за допомогою відповідного виконавчого інструменту, перемістити його у просторовому середовищі та акуратно покласти у визначене місце в коробку.

Для забезпечення точного позиціонування маніпулятор може використовувати заздалегідь задану програму, засновану на фіксованому розташуванні об'єктів. У

контексті промислової автоматизації це дозволяє значно зменшити простой та втрати через неправильне розміщення виробів.

Надалі функціональність даного маніпулятора можна значно розширити шляхом інтеграції систем комп'ютерного зору. Наприклад, встановлення камер над зоною захоплення дозволить реалізувати функції візуального контролю – виявлення дефектів (тріщини, деформації, змін кольору), перевірку наявності маркувань, визначення відповідності форми тощо. Таким чином, робот зможе не лише переміщати вироби, а й виконувати первинну якісну перевірку, відбраковуючи дефектні зразки ще до їх пакування.

Інтеграція штучного інтелекту в систему обробки зображень дозволить реалізувати самонавчальні алгоритми, які з часом покращуватимуть точність виявлення дефектів. Це відкриває перспективи для впровадження концепції "розумної" індустрії (Industry 4.0), де роботизовані системи не тільки виконують механічні дії, а й приймають рішення на основі аналізу даних у реальному часі. У результаті підприємство отримує не лише автоматизацію процесу, але й підвищення загальної якості продукції та зниження витрат [10].

## 3 СИМУЛЯЦІЯ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

### 3.1 Інтегрування 3-D моделі до середовища Webots

Webots – це програмне забезпечення, призначене для емуляції тривимірних мобільних роботів з урахуванням фізичних характеристик: ходячих, плаваючих, літаючих. З його допомогою користувачі можуть створювати віртуальні середовища, впроваджувати і тестувати різні робототехнічні алгоритми і контролери. Програма надає широкий набір інструментів для візуалізації, аналізу та налагодження, що робить її затребуваним ресурсом для інженерів, дослідників і розробників, що працюють в області робототехніки. Програма, що керує роботом, в термінології Webots називається «контролер». Створити її можна на мовах C/C++, Java, Python, мова MatLab. У даній роботі для програмування руху маніпулятора була обрана мова C, через простоту впровадження і написання коду, а також кращий зв'язок з середовищем. Програма являє собою світ – 3-D опис властивостей роботів і їх оточення: фізичних властивостей, типів об'єктів і т.п., організований в ієрархічній формі, для його створення використовується внутрішня DSL (Domain Specific Language) мова. На рисунку 3.1 зображено інтерфейс пустої програми [11].

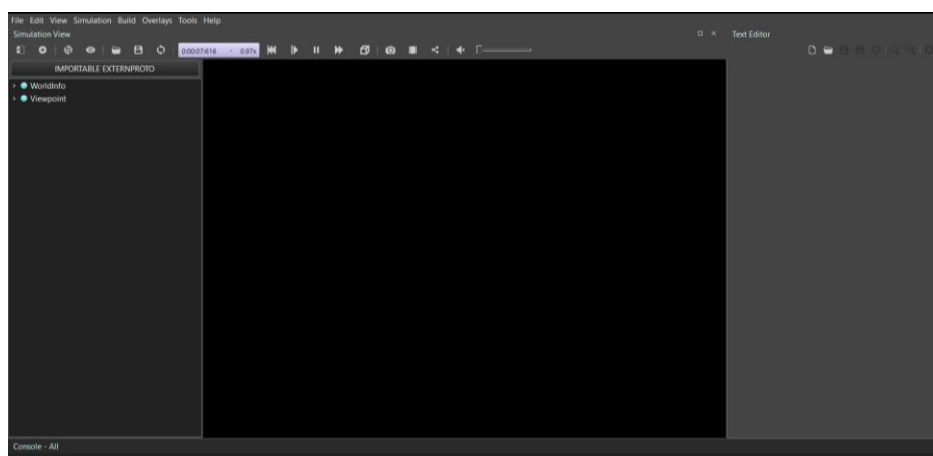


Рисунок 3.1 – Середовище Webots

Наступним кроком стала установка всіх необхідних програмних

компонентів. В рамках даного етапу був встановлений дистрибутив Python версії 3.12. Особлива увага була приділена коректному додаванню Python в системну змінну PATH, що дозволило уникнути типових помилок, пов'язаних з неможливістю запуску інтерпретатора або рір.

Також було виконано підключення бібліотеки controller, що входить в комплект Webots, за допомогою вбудованої системи. Встановлення сторонніх бібліотек (таких як opencv-python, numpy) не було потрібно в даній модифікації проекту, проте середовище було підготовлено таким чином, щоб при необхідності ці модулі могли бути оперативно додані.

Після підготовки оточення було здійснено перехід до створення основної сцени проекту. У графічному інтерфейсі Webots було створено нову сцену з нуля, до якої було додано кілька ключових компонентів. У центрі сцени розміщено модель маніпулятора, яка була успішно інтегрована у віртуальне середовище. У зоні досяжності маніпулятора розташовано два об'єкти типу Box, що дозволяє моделювати взаємодію з ними під час симуляції. Всі елементи сцени розміщено на площині основи (Floor), яка слугує віртуальним "підлоговим" покриттям для всього середовища. Крім того, на сцені присутні кілька коробок, що виконують роль об'єктів сортування та відрізняються між собою розмірами й зовнішнім виглядом, що додає реалізму симуляції та дозволяє тестувати роботу маніпулятора в умовах, наближених до реальних. На рисунку 3.2 зображено маніпулятор біля коробок, які він має взяти та відсортувати.

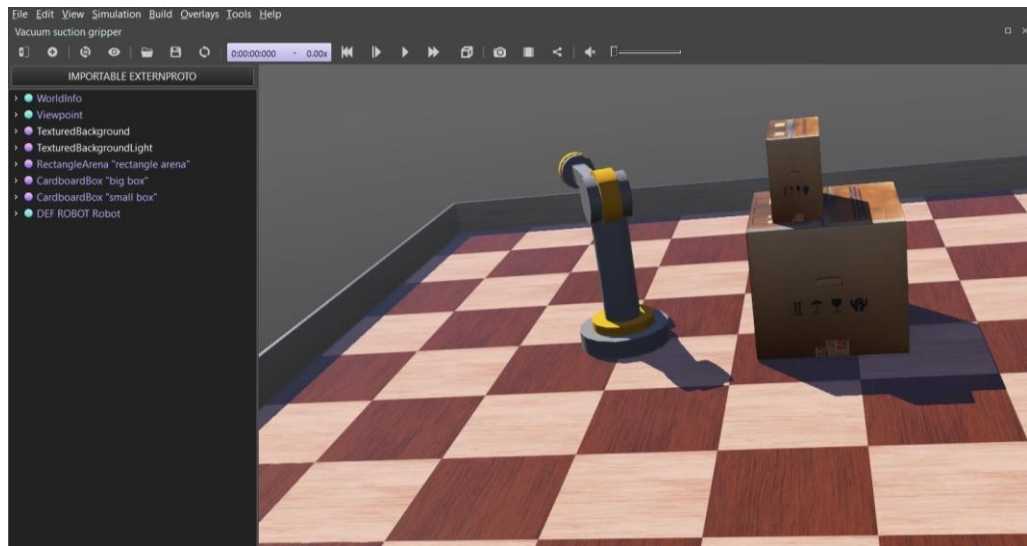


Рисунок 3.2 – Інтегровані деталі

Після успішної інтеграції та розстановки всіх моделей необхідно написати скрипт до маніпулятора. На початку, підключаємо основні бібліотеки та заголовні файли Webots API для роботи з:

- `inertial_unit` – інерційним блоком (сенсор кутів);
- `motor` – моторами;
- `robot` – ініціалізація, крок симуляції тощо;
- `vacuum_gripper` – вакуумним захватом;
- `<stdio.h>` – стандартна бібліотека для виведення (наприклад, `printf`).

Було реалізовано кодом:

```
#include <webots/inertial_unit.h>
#include <webots/motor.h>
#include <webots/robot.h>
#include <webots/vacuum_gripper.h>
#include <stdio.h>
```

Далі визначаємо константні та змінні таким кодом:

```
#define NB_STEPS 20
```

```

#define TARGETS_COUNT 10
static int time_step = 32;
static double TARGET_ANGLES[TARGETS_COUNT][3] = {{2.137462, -
0.147864, 1.778765}, {1.875154, 0.576306, -1.900341},
                                                    {-1.035326, 0.375521, -1.396283}, {0.339103, -
0.031644, 0.809720},
                                                    {-1.035326, 0.375521, -1.396283}, {2.615031,
0.189996, 1.365317},
                                                    {-2.157149, -0.138678, -2.326095}, {0.339103,
0.031644, 0.809720},
                                                    {1.875154, 0.576306, -1.900341}, {-1.035326,
0.375521, -1.396283}}};

```

Надалі ініціюємо функцію очікування позиції. Це користувацька функція, яка очікує, поки інерційний блок (IMU) не покаже необхідні кути орієнтації, кожен крок перевіряється, чи досягнуто необхідних кутів з точністю 0,01. Функція представлена кодом:

```

static void wait_until_target_position (WbDeviceTag inertial_unit, const double
roll_target, const double pitch_target, const double
yaw_target, const int maxSteps) { int steps = maxSteps; while
(maxSteps < 0 || steps > 0) {
    // виконати крок моделювання
    if (wb_robot_step(time_step) == -1)
        break; const double
    *ground_truth_attitude =
wb_inertial_unit_get_roll_pitch_yaw(inertial_unit);
    // перевірити, чи було досягнуто цільове положення
    if (fabs(ground_truth_attitude[0] - roll_target) < 0.01 &&

```

```

fabs(ground_truth_attitude[1] - pitch_target) < 0.01 &&
  fabs(ground_truth_attitude[2] - yaw_target) < 0.01)
break;  if (maxSteps >= 0)
    --steps;
  }
}

```

Тепер можемо перейти до основного входу програми – функції main, і ініціювати роботу і всі пристрої Webots. Вхід представлений кодом:

```

int main(int argc, const char *argv[]) {

  wb_robot_init();
  time_step = wb_robot_get_basic_time_step();
  WbDeviceTag vacuum_gripper = wb_robot_get_device("vacuum gripper");

```

Потім отримуємо пристрої маніпулятора: дескриптор інерційного блоку і вмикаємо його, а також отримуємо мотори для повороту маніпулятора: roll, pitch, yaw і мотор захоплення. Фрагмент коду, що представляє цю дію, наведено нижче:

```

WbDeviceTag inertial_unit = wb_robot_get_device("inertial unit");
wb_inertial_unit_enable(inertial_unit, time_step);
WbDeviceTag roll_motor = wb_robot_get_device("roll motor");
WbDeviceTag pitch_motor = wb_robot_get_device("pitch motor");
WbDeviceTag yaw_motor = wb_robot_get_device("yaw motor");
WbDeviceTag gripper_motor = wb_robot_get_device("gripper motor");

```

Після виконання коду наш маніпулятор буде «шукати» розміщення коробки, та підбере необхідну дистанцію до неї, щоб її взяти. Потім маніпулятор необхідно перемістити у вихідне положення. Код наведено нижче:

```

wb_motor_set_position(roll_motor,          0);
wb_motor_set_position(pitch_motor,        0);
wb_motor_set_position(yaw_motor,         0);
wait_until_target_position(inertial_unit, 0, 0, 0, -1);

```

Надалі потрібно написати код для активації захоплення об'єкта і подальшого циклу захоплення. Також необхідно прописати затримку для повернення в початкову точку. Код змушує маніпулятор взяти коробку, та відкинути її в потрібне місце. Код функцій наведено нижче:

```

printf("Turn on vacuum gripper\n");
wb_vacuum_gripper_turn_on(vacuum_gripper);
wb_vacuum_gripper_enable_presence(vacuum_gripper, time_step);

double slider_position = 0.0;          while
(wb_robot_step(time_step) != -1) {      if
(wb_vacuum_gripper_get_presence(vacuum_gripper))
break;

    slider_position += 0.001;
wb_motor_set_position(gripper_motor, slider_position);
}

wb_robot_step(time_step);
wb_motor_set_position(gripper_motor, 0.0); wb_robot_step(10
* time_step);

```

Для завершення програми пишемо код ,відключаючий сенсори захвату та рухів маніпулятора. Наш маніпулятор вертається в початкове положення і готовий знову виконувати роботу. Код представлений нижче:

```

wb_vacuum_gripper_disable_presence(vacuum_gripper);

wb_robot_cleanup();

return 0;
}

```

### 3.2 Теорія автоматичного управління

Системи автоматичного управління (САУ) – це сукупність технічних засобів та програмних алгоритмів, які забезпечують підтримку або зміну певних параметрів об'єкта без безпосередньої участі оператора. Вони є основою сучасних робототехнічних комплексів, зокрема – промислових роботів-маніпуляторів.

Для забезпечення точності та стабільності роботи маніпулятора необхідно використовувати регулятори, які формують керуючий сигнал на основі поточної похибки. Найбільш поширеними є П, ІІ та ІІД-регулятори. У даній роботі досліджується ІІ-регулятор, оскільки він дозволяє компенсувати як статичну похибку, так і забезпечити прийнятну швидкодію.

Передатна функція це математична модель, що описує динаміку системи в частотній області. Вона використовується для аналізу стійкості, точності, швидкодії та перерегулювання. Загальна передатна функція замкненої САУ має вигляд:

$$W_{cl} = \frac{G(s)}{1+G(s)}$$

де  $G(s)$  – передатна функція розімкненої системи: регулятор + об’єкт керування.

САУ вважається стійкою, якщо її реакція на збурення або початкові умови не призводить до неозначеного зростання вихідного сигналу. Один із найпоширеніших способів перевірки стійкості – алгебраїчний критерій Гурвіца, який дозволяє зробити висновок на основі коефіцієнтів характеристичного рівняння [6].

Після підтвердження стійкості системи оцінюють якість регулювання. До основних показників, що характеризують динамічні властивості системи, належить час встановлення, який визначає інтервал, за який вихідний сигнал досягає встановленого значення і стабілізується в межах допустимого відхилення. Важливою характеристикою є також перерегулювання – це максимальне перевищення вихідним сигналом цільового значення у процесі переходу. Крім того, значущим параметром виступає час запізнення, тобто період, що минає від моменту подачі вхідного сигналу до початку реакції системи.

Ці показники визначаються шляхом комп’ютерного моделювання перехідних процесів, найчастіше – реакції на одиничний стрибковий вплив (функцію Хевісайда).

САУ можна розрахувати, в декілька етапів. Спочатку, припустимо, що рух одного суглоба маніпулятора описується передатною функцією:

$$W(s) = \frac{1}{(0,2s+1)(0,1s+1)}.$$

Це модель аперіодичної системи 2-го порядку.

Модель ПІ регулятора має такий вигляд:

$$GPI(s) = K_p \frac{1}{T_i s} (T_i s + 1).$$

Виберемо, наприклад:  $K_p=3,5$ ,  $T_i=0,5$  та отримаємо замкнуту систему:

$$W_{cl}(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)}$$

Об'єкт керування представлено у вигляді аперіодичної динамічної ланки другого порядку, що характеризує інерційні властивості приводу з редуктором. Як регулятор використано ПІ-контролер, який дозволяє зменшити статичну похибку та підвищити якість регулювання.

На основі отриманої передатної функції замкненої системи проведено алгебраїчний аналіз стійкості за критерієм Гурвіца. Розрахунки підтвердили, що система є стійкою за обраних параметрів.

### 3.3 Охорона праці

Під час розробки програмного забезпечення для симуляції промислового робота-маніпулятора студент виконує значну частину роботи в умовах офісного або домашнього комп'ютерного середовища. У зв'язку з цим основна увага приділяється аналізу умов праці програміста, організації робочого місця, дотриманню вимог електробезпеки, ергономіки, освітлення та психофізіологічних навантажень.

Мета цього розділу – забезпечити безпечні та комфортні умови праці, зменшити ризики професійних захворювань і травматизму.

Специфіка такої роботи передбачає тривале перебування у сидячому положенні перед екраном монітора, що спричиняє низку потенційних ризиків, серед яких: підвищене навантаження на зорову систему, порушення функціонування опорно-рухового апарату, а також психофізіологічні перенавантаження, пов'язані з високою інтенсивністю розумової праці. У зв'язку з цим особливого значення набуває дотримання принципів ергономіки: правильне

розміщення елементів робочого місця (монітора, клавіатури, стільця), раціональна організація простору, підтримання оптимального мікроклімату (температури, вологості повітря), а також забезпечення належного рівня освітлення.

Робоче місце повинно відповідати вимогам санітарних норм, визначених ДСанПіН 3.3.2.007-98. Зокрема, висота столу має становити 70–75 см, а стілець повинен бути регульованим для забезпечення правильної посадки. Монітор слід розташовувати на відстані 50–70 см від очей, при цьому його верхній край має бути на рівні лінії погляду користувача. Освітлення робочої зони повинно бути природним із лівого боку, а за потреби використовувати додаткову настільну лампу з яскравістю 400–500 лк. Мікроклімат у приміщенні повинен підтримуватися в межах температури 20–24 °С і відносної вологості 40–60%. Необхідне також регулярне провітрювання кімнати не менше двох разів на день або забезпечення постійної вентиляції [2].

Усі електроприлади, включаючи комп'ютер, монітор та джерела живлення, повинні відповідати вимогам класу захисту I або II згідно з ГОСТ 12.2.007.0-75. Забороняється працювати на несправному обладнанні, перевантажувати розетки, а також необхідно регулярно перевіряти стан електроізоляції. Усі пристрої повинні бути сертифікованими. Біля робочого місця бажано мати вогнегасник, наприклад, порошковий типу ВП-2. Згідно з класифікацією ДБН В.1.1-7-2016, така робоча зона належить до категорії пожежної небезпеки В. Категорично заборонено закривати вентиляційні отвори системних блоків або залишати обладнання ввімкненим без нагляду.

Оскільки робота за комп'ютером супроводжується значним нервово-емоційним навантаженням і знижує працездатність, для збереження здоров'я рекомендовано щогодини робити перерви тривалістю 5-10 хвилин. У цей час доцільно виконувати прості вправи для очей і спини, а також чергувати інтелектуальну діяльність з фізичною активністю, такою як легка прогулянка або розтяжка. Не менш важливою складовою є дотримання вимог електробезпеки. Оскільки комп'ютерне обладнання живиться від мережі змінного струму, воно

повинно бути технічно справним, мати надійну ізоляцію та підключатися через справні електричні розетки. З метою запобігання пожежонебезпечним ситуаціям рекомендується наявність первинних засобів пожежогасіння, зокрема порошкового вогнегасника.

З метою профілактики перенавантаження організму при інтенсивній роботі за комп'ютером необхідно дотримуватися режиму праці та відпочинку. Відповідно до чинних санітарно-гігієнічних норм, рекомендується проводити короткочасні перерви кожні 60 хвилин безперервної роботи. Такі перерви сприяють зменшенню втоми, відновленню концентрації уваги та зниженню негативного впливу статичних навантажень.

Отже, за умови належної організації робочого процесу, дотримання вимог безпеки праці та санітарно-гігієнічних нормативів, умови праці під час виконання дипломної роботи можуть вважатися достатньо комфортними та безпечними для здоров'я виконавця. Забезпечення сприятливих умов праці є важливим чинником не лише збереження здоров'я, а й підвищення продуктивності та якості результатів інженерної діяльності.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було всебічно досліджено сучасні підходи до створення та програмування промислових роботів-маніпуляторів у контексті комп'ютерно-інтегрованих технологій. Проведено глибокий аналіз конструктивних, функціональних і експлуатаційних характеристик роботів, розглянуто їхню класифікацію, технічні особливості та області застосування в сучасному виробництві. Це дозволило сформуванати цілісне уявлення про вимоги до ефективної роботизованої системи та підґрунтя для побудови власного технічного рішення.

На етапі проєктування було створено тривимірну модель маніпулятора із врахуванням кінематичних обмежень і реалістичних параметрів, необхідних для подальшої симуляції. Було обрано ефективне CAD-середовище (Fusion 360) та середовище симуляції Webots, що забезпечило гнучке та наочне представлення роботи маніпулятора в умовах віртуального середовища. Реалізована модель дозволила відпрацювати базові сценарії переміщення об'єктів, включно з програмуванням кінематики, логіки керування та взаємодії з об'єктами за допомогою вакуумного захвату.

Програмна частина проєкту реалізована мовою C. В рамках симуляції було створено набір функцій для ініціалізації пристроїв, позиціонування та взаємодії з об'єктами в сцені. Було протестовано декілька сценаріїв використання системи: від освітніх до виробничих, що підтвердило універсальність обраного підходу. Симуляційна платформа дозволяє легко модифікувати структуру, траєкторії та алгоритми для подальшого використання в різних галузях.

Особливу увагу приділено аналізу можливостей інтеграції в реальне виробництво. Розглянуто застосування контролерів (PLC), сенсорних модулів, систем комп'ютерного зору, SCADA та IoT-технологій, що відкриває перспективи переходу від симуляції до фізичної реалізації робототехнічної системи. Також

здійснено економічне обґрунтування проєкту, де показано вигоди від застосування цифрових двійників на етапі R&D порівняно з традиційними методами проєктування.

У результаті проведеної роботи створено працездатну основу для майбутніх розробок у галузі автоматизації. Отримані результати можуть бути використані як навчальна платформа, прототип для промислових впроваджень або база для реалізації інтелектуальних модулів керування. Подальший розвиток системи передбачає включення алгоритмів машинного навчання, розширення функціоналу НМІ та підтримку промислових стандартів, що забезпечить відповідність вимогам Industry 4.0.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлювання. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В.Токарева, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2022. 66 с.
3. Харківський національний університет радіоелектроніки [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www /URL: https://nure.ua/department/kafedrakompyuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam](http://www.nure.ua/department/kafedrakompyuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam)
4. Urrea, C. Recent Advances and Challenges in Industrial Robotics: A Systematic Review of Technological Trends and Emerging Applications [Електронний ресурс] / C. Urrea, J. Kern // Processes. – 2025. – Vol. 13, No. 3. – С. 832. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/3/832>
5. Kurt, H. Simulation-Based Control Architecture Using Webots and Simulink [Електронний ресурс] / H. Kurt, A. Cayir // arXiv. – 2025. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2404.10874>
6. Gihleb, R. Industrial robots, workers' safety, and health [Електронний ресурс] / R. Gihleb, O. Giuntella, L. Stella, T. Wang // Labour Economics. – 2022. – Vol. 78. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.labeco.2022.102205>
7. Chen, Y. Robots as guardians: Industrial automation and workplace safety in

China [Електронний ресурс] / Y. Chen, S. Li // ScienceDirect. – 2024. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925753524000450>

8. Anwer, M. Trends in Robotics Research in Occupational Safety and Health

[Електронний ресурс] / M. Anwer, L. Manca, R. D. Saldanha // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2022. – Vol. 19(11). – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/11/6843>

9. Hadi, M. Four-Degree Digital Twin Robotic Arm in Webots Environment

[Електронний ресурс] / M. Hadi, T. Ahmad // ResearchGate. – 2024. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/375442029>

10. Cyberbotics. Webots: PUMA 560 Manipulator Documentation [Електронний ресурс] // Cyberbotics. – 2020. – Режим доступу: <https://cyberbotics.com/doc/guide/puma560>

11. Hamza, F. Simulation of a Mobile Manipulator on Webots [Електронний ресурс] / F. Hamza, J. Kadri // ResearchGate. – 2020. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/344611118>

12. Financial Times. Why robots are not the answer to U.S. manufacturing reshoring hopes [Електронний ресурс] // FT. – 2025. – Режим доступу: <https://www.ft.com/content/6434b7cb-0f28-4293-8aa9-6c47eacbd420>

13. Bryant, L. Warehouse Robotics and Worker Safety [Електронний ресурс] / L. Bryant // Journal of Business Ethics. – 2025. – Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10551-025-05348-1>

14. ISO 10218-1:2021 Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots [Електронний ресурс] // International Organization for Standardization. – 2021. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/70972.html>

15. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарева, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2022. 66 с.

16. Харківський національний університет радіоелектроніки

[Електронний ресурс] /— Режим доступу: [www /URL:](http://www.nure.ua)

<https://nure.ua/department/kafedra-kompyuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam>