

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення технічних засобів маніпуляційної системи мобільного робота
Festo Robotino

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи КТРСм-20-1

Імшенецький Я.О.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерні та
робототехнічні системи

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Цимбал О. М.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

Невлюдов І. Ш.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2021р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАМ _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Комп'ютерні та робототехнічні системи _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ _____
(підпис)

«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Імшенецькому Ярославу Олександровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Розроблення технічних засобів маніпуляційної системи мобільного
робота Festo Robotino _____

Затверджена наказом по університету від _____ 08.11.2021 №1698 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 06.12.2021 р. _____

3. Вихідні дані до роботи _____ мобільний робот Festo Robotino, засоби моделювання
CoppeliaSim (V-REP), мова програмування LUA _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____ Аналіз технічного завдання; Вступ;
Визначення актуальності роботів у медицині; Огляд особливостей конструкцій та види
маніпуляторів, що використовуються в наш час; Побудова математичної моделі та
розробка підходу до вирішення зворотної задачі кінематики; Підготовка програмного
забезпечення для маніпулятора у робототехнічному симуляторі; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 15 сторінок формату А4

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання, вступ	21.05.21	виконав
2	Визначення актуальності питання використання роботів у медицині	10.09.21	виконав
3	Огляд особливостей конструкцій та види маніпуляторів, що використовуються в наш час	24.09.21	виконав
4	Побудова математичної моделі та розробка підходу до вирішення зворотної задачі кінематики	15.10.21	виконав
5	Підготовка програмного забезпечення для маніпулятора у робототехнічному симуляторі	12.11.21	виконав
6	Оформлення пояснювальної записки	10.12.21	виконав
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	22.12.21	виконав
8	Подання роботи на рецензію	24.12.21	виконав
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	26.12.21	виконав
10	Подання роботи до ЕК	27.12.21	виконав

Дата видачі завдання 08.11.2021 р.

Студент _____
(підпис)

Імшенецький Я.О.

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Цимбал О. М.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 с., 2 табл., 33 рис., 3 дод., 19 джерел.

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, МАНІПУЛЯТОР, СИМУЛЯТОРИ РОБОТІВ,
FESTO ROBOTINO.

Об'єкт дослідження – система керування маніпулятором мобільного робота.

Предмет дослідження – моделювання кінематики маніпулятора.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка технічних засобів та моделювання маніпуляційної системи мобільного робота.

Методи дослідження: для розроблення маніпуляторної системи буде використано робототехнічний симулятор V-REP. Мова програмування LUA.

Практичним результатом роботи є демонстраційна сцена в симуляторі V - REP, 3D-модель прототипу, програма для керування маніпулятором.

Розроблений проект може бути використаний в медичних закладах для доставки ліків, або на складах для пересування невеликих об'єктів.

ABSTRACT

Explanatory note: 72 pp., 2 tabl., 33 figs., 3 app., 19 sources.

MOBILE ROBOT, MANIPULATOR, ROBOT SIMULATORS, FESTO ROBOTINO.

The object of research is the control system of the mobile robot manipulator.

The subject of research is modeling of kinematics of the manipulator.

The purpose of the qualification work is the development of technical means and modeling of the manipulation system of the mobile robot.

Research methods: V-REP robotic simulator will be used to develop the manipulator system. LUA programming language.

The practical result of the work is a demonstration scene in the simulator V - REP, 3D-model of the prototype, a program for controlling the manipulator.

The developed project can be used in medical facilities for drug delivery, or in warehouses for moving small objects.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	6
Вступ.....	7
1 Аналіз предметної області.....	8
1.2 Мобільні роботи.....	11
1.3 Класична структурна схема інтелектуальної системи керування.....	12
1.4 Висновки до розділу.....	14
2 Технічна частина проекту.....	15
2.1 Обґрунтування доцільності використання комп'ютерних симуляторів у робототехніці.....	15
2.3 Визначення робочої зони маніпулятора та координат маніпулятора.....	23
2.4 Опис захватного пристрою.....	33
2.5 Висновки до розділу.....	38
3 Опис реалізації проекту.....	39
3.1 Зворотна задача кінематики (ЗЗК).....	39
3.1.1 Проблеми вирішення ЗЗК та запропоновані рішення.....	46
3.1.2 Рішення ЗЗК для маніпулятора NiryOne в середовищі CoppeliaSim.....	47
3.1.3 Структурний аналіз.....	47
3.2 Розробка у CoppeliaSim.....	50
3.3 Безпека життєдіяльності та охорона праці.....	58
3.4 Висновки до розділу.....	65
Висновки.....	66
Додаток А Код програми для сцени.....	69
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЗЗК – зворотне задача кінематики;

ЗП – захоплювальний пристрій;

КП – кінематична пара;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПЗК – пряма задача кінематики;

ПК – персональний комп'ютер;

ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема;

ПР – промисловий робот;

ВСТУП

У сучасних реаліях пандемії кожен контакт людей один з одним, це ризик. Особливо це важливо в інфекційних медичних закладах, у яких лікарям та медсестрам необхідно постійно контактувати з хворими. І робототехніка могла б допомогти полегшити цю проблему.

У цій роботі відбувається розробка мобільного робота, який розвозитиме ліки по лікарні, і скорочуватиме зайві контакти з хворими. Для вивантаження та завантаження ліків використовуватиметься маніпулятор. Рушійною платформою для робота буде мобільний робот Festo Robotino. Основним інструментом проектування стане симулятор робототехнічних систем V-REP.

Об'єкт дослідження – система керування маніпулятором мобільного робота.

Предмет дослідження – моделювання кінематики маніпулятора.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка технічних засобів та моделювання маніпуляційної системи мобільного робота.

Функціонально роботу необхідно буде за допомогою камери та кольорових напрямних, розташованих на підлозі лікарні, знайти маршрут або до точки завантаження та вивантаження. Перебуваючи на точці, залежно від завдання, маніпулятором буде виконано завантаження або вивантаження вантажу.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- розробити конструкцію установки маніпулятора;
- розробити програмне забезпечення для управління маніпулятором;
- розробити тестову сцену у V-REP для перевірки працездатності системи.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Медичні роботи

Роботи в медицині змінюють підхід до проведення хірургічних операцій, оптимізують подачу та дезінфікування витратних матеріалів та дозволяють постачальникам послуг приділяти більше уваги пацієнтам. Intel пропонує широкий асортимент технологій для розробки роботів для охорони здоров'я, включаючи хірургічні, модульні, обслуговуючі, соціальні, мобільні та автономні роботи.

Перші медичні роботи, що з'явилися в 1980-х, надавали допомогу при проведенні хірургічних операцій, використовуючи технології роботизованих рук. Згодом технології комп'ютерного зору із застосуванням штучного інтелекту та аналіз даних змінили роботів, розширивши їх можливості для участі у багатьох галузях охорони здоров'я (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Новозеландський робот маніпулятор-терапевт

Зараз роботи застосовуються не тільки в операційних, а й у клінічній практиці для підтримки працівників системи охорони здоров'я та покращення

якості обслуговування пацієнтів. Лікарні та клініки під час пандемії COVID-19 почали використовувати роботів для виконання значно ширшого спектра завдань для зниження впливу патогенів. Стало ясно, що операційна ефективність та зниження ризиків, що забезпечуються роботами у охороні здоров'я, приносять користь у багатьох галузях.

Наприклад, роботи можуть самостійно чистити та готувати палати для пацієнтів, обмежувати кількість особистих контактів у відділеннях інфекційних захворювань. Роботи з медичним ідентифікаційним програмним забезпеченням із застосуванням штучного інтелекту знижують час, необхідний для ідентифікації, пошуку відповідності препаратів пацієнтам та розподілу препаратів між пацієнтами у лікарнях.

У міру розвитку технологій роботи працюватимуть все більш автономно, в деяких випадках виконуючи певні завдання самостійно. Внаслідок цього лікарі, медсестри та інші працівники охорони здоров'я можуть зосередити увагу на підвищенні якості надання послуг пацієнтам.

Робототехніка в охороні здоров'я підвищує рівень якості обслуговування пацієнтів, ефективність робіт у клінічних умовах та забезпечує безпечне середовище як для пацієнтів, так і для медичних працівників.

Медичні роботи підтримують мінімально інвазивні процедури, проводять індивідуалізований та частий моніторинг стану пацієнтів із хронічними захворюваннями, інтелектуальну терапію та соціалізують літніх пацієнтів. Крім того, оскільки роботи знижують робочі навантаження медичного персоналу, медсестри та інші особи, що здійснюють догляд, можуть виявляти більш високий рівень співчуття до пацієнтів та взаємодії з ними, що може сприяти покращенню самопочуття у довгостроковій перспективі.

Роботи, що обслуговують, оптимізують рутинні завдання, знижують фізичні навантаження персоналу і забезпечують більш послідовні робочі процеси. Ці роботи можуть вести облік інвентарю, робити своєчасні замовлення витратних матеріалів, обладнання та ліків, коли це необхідно. Мобільні роботи, що

чистять і дезінфікують, дозволяють швидко обробляти і готувати лікарняні приміщення для нових пацієнтів.

Роботи, що обслуговують, забезпечують безпеку персоналу, переміщуючи витратні матеріали та білизну в лікарнях, де є ризик впливу патогенних мікроорганізмів. Чистячі та дезінфікуючі роботи обмежують ризик впливу патогенних мікроорганізмів і знижують ризик зараження інфекційними захворюваннями в лікарні (HAI), сотні закладів охорони здоров'я вже використовують роботів такого типу.¹ Соціальні роботи допомагають переміщати важкі об'єкти, наприклад ліжка та пацієнтів

Робототехніка в охороні здоров'я підвищує рівень якості обслуговування пацієнтів, ефективність робіт у клінічних умовах та забезпечує безпечне середовище як для пацієнтів, так і для медичних працівників.

Завдяки розвитку технологій управління рухом робота хірургічних роботів стала точнішою. Роботи допомагають хірургам проводити складні мікропроцедури без великих розрізів. З розвитком хірургічної робототехніки роботи з підтримкою штучного інтелекту в майбутньому будуть використовувати комп'ютерний зір для навігації з окремих частин тіла, уникаючи нервів та інших перешкод. Деякі хірургічні роботи навіть зможуть проводити операції самостійно під наглядом хірургів з консолі.

Хірургічні операції з допомогою робототехніки поділяються на дві основні категорії.

Мінімально інвазивні операції на тулубі. Сюди входять гістеректомія, простатектомія, бариатрична хірургія, а також інші операції з основним фокусуванням на м'яких тканинах. Після введення через невеликий розріз ці роботи фіксуються, створюють стійку платформу, з якою можна проводити операції з віддаленого пульта управління. Колись відкриті операції з розрізами великого розміру були нормою для більшості процедур.

1.2 Мобільні роботи

Мобільний робот – автоматична машина, в якій є шасі, що рухається, з автоматично керованими приводами. Мобільні роботи створені для пересування у просторі, найчастіше для того, щоб дістатися до місць, недоступних для людини. На даний момент роботи освоїли практично всі види пересування, що зустрічаються в живій природі: ходьба (як на двох, так і на чотирьох ногах), плавання, літання, повзання, деякі навіть здатні повзати по стінах.

Поняття інтелектуальних мобільних роботів. Існує ціла низка завдань, при яких застосування дистанційно-керованих роботів утруднене або неможливе.

Наприклад:

- неможливо організувати канал зв'язку із роботом;
- є можливість втрати зв'язку з роботом при його знаходженні в недоступному для людини місці;
- завдання, що виконується роботом, не передбачає ручного управління (роботи-прибиральники, роботи-офіціанти, роботи-кур'єри тощо);
- конструкція робота настільки складна, що людина не здатна контролювати весь функціонал робота.

Для вирішення цих завдань в даний час активно проводяться розробки автономних мобільних роботів. У силу того, що такі роботи повинні працювати в заздалегідь невідомих умовах, а орієнтуватися у зовнішньому середовищі на підставі показання великої кількості датчиків застосування класичних математичних підходів до таких систем виявляється неможливим.

У 60-х роках минулого століття з'явився напрям, званий інтелектуальні системи. Дані системи діють не за заздалегідь заданою програмою, а самостійно приймають рішення на основі інформації про навколишнє середовище та закладені в них знання. Функціонування таких систем у складному та заздалегідь

гідь невідомому середовищі та в переважній кількості випадків приймають вірне рішення, засноване на закладеній у них логіці поведінки.

Інтелектуальною системою в техніці називають системи, що працюють не за жорстко заданою програмою (циклограмою), а приймають рішення на основі закладених у них правил. Інтелект таких роботів полягає у виконанні найпростіших (з погляду людського розуму) завдань, проте досить складних у технічній реалізації. Наприклад, класичний автономний рух мобільного робота до цільової точки у середовищі з перешкодами. Це завдання виконується людським розумом на підсвідомому рівні. Проте її технічна реалізація може бути досить складною.

1.3 Класична структурна схема інтелектуальної системи керування

Класична структурна схема інтелектуальної системи управління мобільним роботом представлена рисунком 1.2. Вона включає до свого складу такі структурні одиниці:

Нижній (привідний) рівень системи керування. Під приводним рівнем мають на увазі регулятори швидкості та положення, реалізовані всередині мікропроцесорів контролера управління виконавчими механізмами робота. На вхід нижнього рівня системи управління надходять завдання на швидкості та кути повороту ланок, а на виході формуються керуючі напруги для двигунів робота. В останні роки у зв'язку з бурхливим зростанням продуктивності мікроконтролерів та активним впровадженням ПЛІС (програмованих логічних матриць) стало модно розробляти для нижнього рівня системи управління інтелектуальні регулятори, інваріантні до інерції навантаження та самого навантаження (у межах потужності двигуна).

Тактичний рівень системи управління (система управління рухом) є інтелектуальними алгоритмами, що вирішують завдання руху мобільного робота в середовищі з перешкодами, а також контурна система управління рухом

маніпулятора робота (ПЗК/ЗЗК), в т.ч. інтелектуальні системи обходу перешкод маніпулятором робота. На вхід тактичного рівня системи управління надходять цільові точки як системи управління рухом, так маніпулятора робота. На виході – задані швидкості та кути орієнтації ланок.

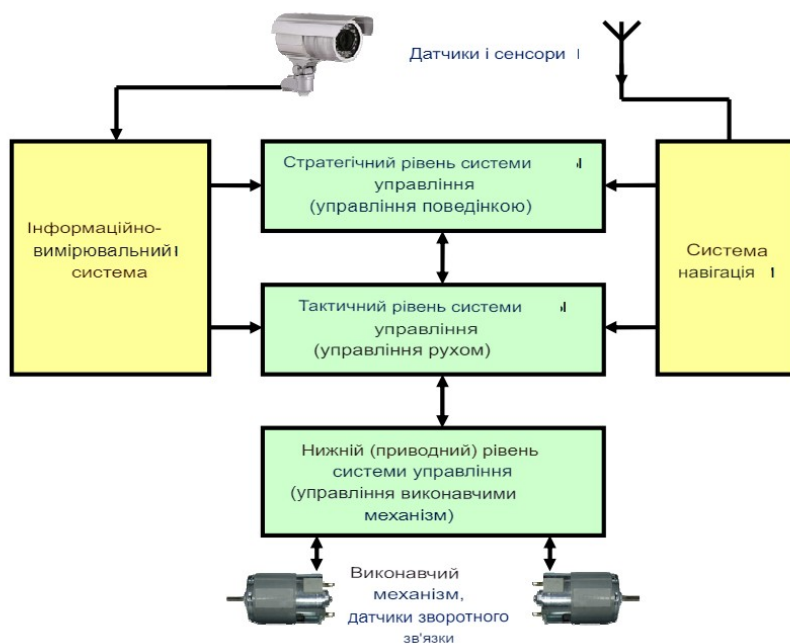


Рисунок 1.2 – Класична структурна схема інтелектуальної системи керування мобільним роботом

Стратегічний рівень системи управління (система управління поведінкою) є інтелектуальною системою, що дозволяє реалізувати складні послідовності дій робота, що призводять до вирішення їм поставленого завдання. Стратегічний рівень системи управління розкладає поставлену задачу більш дрібні підзавдання до того часу, поки не буде складатися із завдань для тактичного рівня системи управління.

Система навігації дозволяє роботу визначати своє розташування та орієнтацію на карті місцевості. Ця інформація необхідна для вибору роботом напрямку руху до цільової точки.

Інформаційно-вимірювальна система дозволяє роботу отримувати та обробляти інформацію, отриману з різних сенсорів та датчиків. У ряді випадків на основі обробки інформації з декількох датчиків вдається отримати нову інформацію, наприклад, на основі спільної обробки зображень з двох камер отримати стереозображення, на основі якого обчислити відстані до перешкод.

Сукупність всіх датчиків та сенсорів називають системою відчуття. До неї відносяться відеокамери, мікрофони, далекоміри, Стратегічний рівень системи управління (керування поведінкою) Тактичний рівень системи управління (управління рухом) Нижній (привідний) рівень системи управління (управління виконавчими механізмами) Виконавчі механізми, датчики зворотного зв'язку Інформаційно-вимірювальна система Система навігації Датчики та сенсори акселерометри, гіроскопи, магнітометри, деякі датчики зворотний зв'язок (наприклад, датчики на колесах).

1.4 Висновки до розділу

В розділі 1 проводиться огляд медичних роботів, різні види мобільних роботів, також розглянуто структуру інтелектуальних систем керування.

Проаналізовано робототехнічних системи та наведена їх класифікація. Розглянута основна інформація про існуючі комп'ютерно робототехнічні системи, які використовуються у фармацевтиці.

Проведено аналіз структури інтелектуальних систем керування та приклад їх використання в мобільних роботах.

2 ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА ПРОЕКТУ

2.1 Обґрунтування доцільності використання комп'ютерних симуляторів у робототехніці

Сучасну комп'ютерну техніку можна використовувати для проектування, імітації та випробування промислових та технічних систем [5]. Цей підхід став можливим внаслідок стрімкого зростання продуктивності всіх комп'ютерних систем, що випускаються, аж до настільних ПК.

Прикладами такого підходу можуть бути численні програмні комплекси симуляції технічних систем. Найбільшим та відомим комплексом такого типу є пакет Simulink для імітації технічних систем, що входить до складу програмного продукту Matlab від Mathworks. Цей пакет має велику бібліотеку різноманітних технічних засобів і пристроїв, більшість з яких доступна для випробування на персональному комп'ютері. Пакет дає незамінну часом можливість зібрати, налаштувати, запустити та випробувати технічну систему практично будь-якої складності [5].

Іншим прикладом виступає пакет SolidWorks Simulation, універсальний інструмент для аналізу міцності конструкцій методом кінцевих елементів. У ньому, на вирішення завдань симуляції, забезпечується повноцінний статичний аналіз, як деталі, і складання з допомогою кінцевих елементів твердого тіла, поверхонь і балок. Реалізовано різноманітні контактні умови та всілякі віртуальні з'єднувачі [5].

Одним із старожилів програм комп'ютерної симуляції технічних систем є, що нараховує свою історію ще з 1986-го року (перша версія була випущена для комп'ютера Apple), пакет LabView. Це середовище графічного програмування, яке використовують технічні фахівці, інженери, викладачі та вчені по всьому світу для швидкого створення комплексних додатків у завданнях вимірювання, тестування, управління, автоматизації наукового експерименту та освіти [6].

Іншим прикладом використання цього підходу є налагодження та тестування керуючих програм для промислового обладнання та технічних систем. Програмування таких пристроїв дещо відрізняється від стандартних прийомів написання програм для персональних комп'ютерів. Мови програмування застосовуються специфічні, що допускають використання різних стандартів. Управління подібними системами можливе лише за дотримання умови реального часу [6]. І тут комп'ютерні засоби здатні запропонувати можливості для імітації самих технічних систем, пристроїв управління ними та вбудованих мов програмування. Створювані з цією метою програмні комплекси, здатні імітувати поведінку технічних систем, у тому числі, що мають програмне управління, отримали назву Комп'ютерні симулятори.

Найбільш близьким синонімом Симуляції, що виражає сенс та зміст терміна, є слово Імітація. Симуляцію не слід плутати з моделюванням. Хоча, зміст цих двох термінів має досить багато подібностей, і в цілому, терміни схожі один на одного, між ними є принципова відмінність. Моделювання являє собою сукупність алгоритмів і виразів, покликаних описати поведінку системи, що моделюється. Симуляція ставить за мету запуск і виконання комп'ютерної програми, що містить всі ці алгоритми і вирази. Тобто, симуляція використовує отримані при моделюванні алгоритми та вирази з метою імітації системи, її властивостей та поведінки за різних параметрів середовища. Можна сказати, що моделювання дає уявлення (як правило, у зменшеному масштабі) будь-якої системи чи конструкції. Модель дозволяє користувачеві передбачити, як зміни в цій системі позначаться на інших її частинах. При симуляції відбувається оперування моделлю з метою оцінки функціонування системи за необхідних умов [7].

Симулятор – імітатор, механічний або комп'ютерний, що відтворює керування будь-яким процесом, апаратом чи технічним засобом. У разі робототехнічної системою. Можливе інше визначення терміна. Симулятори – програмні та апаратні засоби, що створюють враження дійсності, відображаючи частину реальних явищ та властивостей у віртуальному середовищі.

Процес симуляції супроводжується відображенням реального об'єкта (системи) в імітатор, який виконується, змінюючи свій стан з часом, причому час необоротний, він не уповільнюється і не прискорюється. Стан системи визначається станом її елементів, а кожен елемент має набір властивостей (характеристик).

Також слід дати визначення безпосередньо симуляторам робототехніки. Робототехнічний симулятор – засіб створення та випробування прикладних програм для робота, що не вдається до використання реальної машини, і цим дозволяє економити матеріальні та тимчасові ресурси [8].

Основним об'єктом, яким оперує робототехнічний симулятор є віртуальний робот. Віртуальний робот – це імітатор реального робота, який відтворюється у віртуальному середовищі, представлений у вигляді просторової моделі [8]. У складі симулятора віртуальний робот можна називати просто роботом.

Найчастіше, неможливо використовувати реальні виробничі системи для перевірки нових, що вимагають випробування, технологій. У такому разі використання офф-лайн програмування та симуляції навколишнього середовища може бути дуже корисним для розробки та, особливо, для оптимізації промислових систем. Як приклад, можна навести систему промислової зачистки скла, реалізовану як симуляції у віртуальному середовищі [8]. Система була реалізована за допомогою графічного інструменту RobotStudio 5 від ABB Robotics, а тривимірні зображення деяких компонентів було спроектовано у SolidWorks. Результат симуляції з візуалізацією представлений на рисунках 2.1 та 2.2.

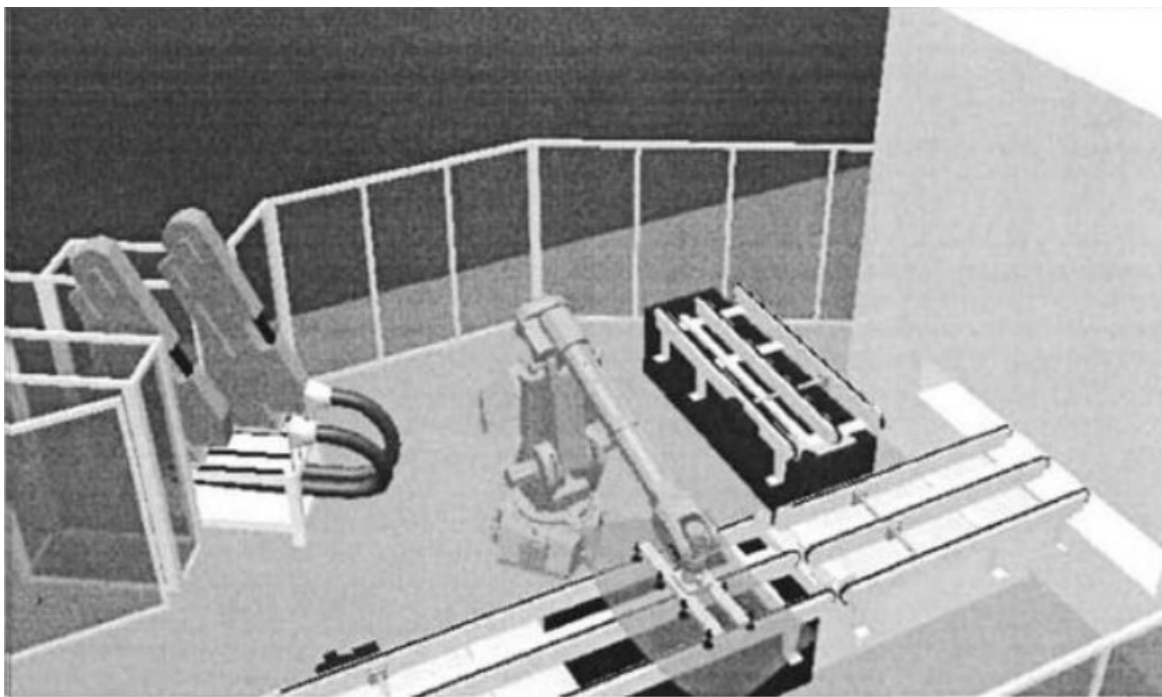


Рисунок 2.1 – Промисловий осередок з роботом, симульований у віртуальному середовищі ПК

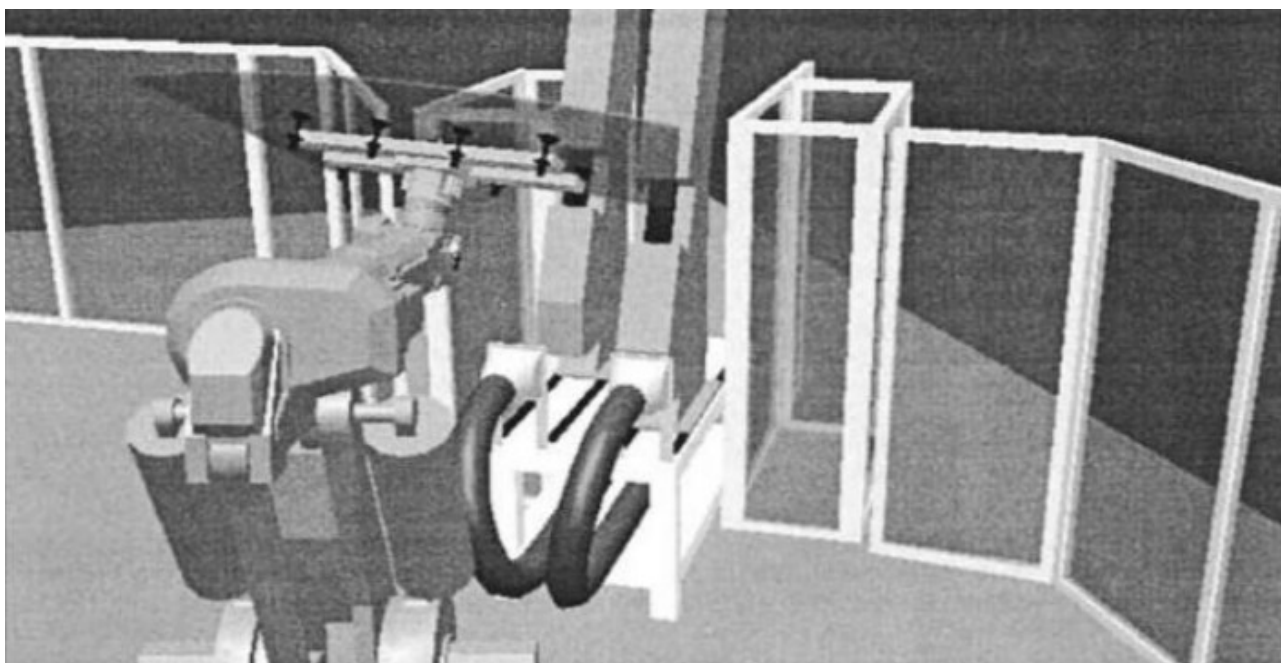


Рисунок 2.2 – Комп'ютерна симуляція процесу промислового зачищення скла.
Робота взято крупним планом

Таким чином, використання програмних пакетів симуляції робототехнічних систем має певні переваги [8]:

графічна модель та програмне забезпечення, що здійснює імітацію, є потужним засобом, що дозволяє розробляти нові системи не зупиняючи виробництво;

– дозволяє інженеру за системами відтворювати та оптимізувати рішення до тестування на реальному виробничому осередку з метою остаточного впровадження;

– надає потужний інструмент для аналізу нових виробничих сценаріїв, нових послідовностей технологічних операцій, до їхнього тестування або навіть до пропозиції цих нововведень до розгляду працівникам;

– надає відмінне середовище для демонстрації замовнику здійсненності конкретного типу виробництва, промислового циклу;

– оскільки в даному середовищі реалізована робота ПЛК, стає можливою розробка та налагодження керуючих програм та їх випробування на віртуальній моделі.

Єдиним недоліком є труднощі у приведенні імітатора до відповідності до реальної системи. Це означає, що від розробника симулятора потрібно провести повноцінне калібрування системи на підставі точних відомостей про реальний прототип. У цьому випадку отримане на симуляторі технічне рішення (програма, параметри) може бути безпосередньо впроваджено в реальній системі, з мінімальними правками та коригуваннями.

Отже, розробка симуляторів програмного управління робототехнічними системами – досить перспективний напрямок у галузі програмних засобів підтримки автоматизації та роботизації виробництва, що активно розвивається. Це завдання є актуальним і сучасним, і його вирішують провідні компанії-виробники програмного забезпечення.

Розглянувши основні поняття та визначення у сфері симуляції роботів, перейдемо до загального аналізу основних складових комп'ютерних симуляторів робототехніки. З'ясуємо базові компоненти та зв'язки між ними, завдяки

яким програмний симулятор здатний здійснювати поставлене перед ним завдання імітації активності робота у віртуальному середовищі комп'ютера.

Графічний інтерфейс користувача. Реалізується за допомогою стандартних компонентів візуального наповнення вікон, доступних у графічній оболонці операційної системи [8]. Робоче вікно програми має надавати користувачеві доступ до всіх основних та додаткових функцій. Віртуальний робот представляється як тривимірний, або, що рідше, двовимірний графічний модель. Користувач, як правило, в режимі реального часу, може оцінювати значення координат робота, контролювати ключові вихідні параметри, а також може вносити зміни в керуючий вплив. Для спрощення сприйняття кнопки можуть підсвічуватись кольорами. Як правило, надаються можливості маніпулювання кутом огляду та масштабом збільшення (zoom), а також швидкістю переміщення моделі. Слід зазначити, що всі досліджені системи комп'ютерної симуляції роботів (що буде розглянуто далі докладніше) мають інтерфейс візуалізації моделі робота обов'язково. Промальовування робота на графічному полі, очевидно, вважається невід'ємною частиною відповідних симуляторів завжди і за будь-яких умов та обставин. Таким чином, всі симулятори вимагають від користувача постійно аналізувати функціонування віртуального робота візуально та на підставі цього робити необхідні висновки. Про те, чи можна звільнити користувача від цієї функції та довірити її симулятору, буде сказано пізніше.

Модуль обчислення координат. Віртуальна модель робота є, перш за все, каркас, що складається з точок у двох-або тривимірному просторі, які визначають положення моделі у просторі. Текстури, якими заповнюється каркас, можуть бути різними, або їх може бути зовсім, але каркас, описуваний масивом точок, необхідний.

Оскільки симуляція передбачає динамічну активність віртуального робота, координати точок повинні з певним проміжком часу змінюватися. Для обчислення нових координат застосовуються різні математичні моделі.

Якщо управління ланками робота здійснюється відповідно до кутів повороту, що задаються, то можливі два варіанти обчислення нових координат

каркаса – рішення прямої або зворотної кінематичних завдань [9]. Прямі кінематичні задачі передбачає, що системі управління передається послідовність кутів повороту для кожної з відповідних ланок маніпулятора. Зворотна передбачає, що задається лише точка, у яку необхідно позиціонувати кінцеву ланку, інші кути повороту слід визначити самостійно, з урахуванням наявних просторових перешкод. Для вирішення цих завдань використовуються матриці та тригонометричні вирази. Також, використовуються спеціальні формули та коефіцієнти, що приводять у відповідність впливу приводів на виконавчі органи у віртуальному середовищі, до аналогічних процесів у реальних робототехнічних системах. На основі цих виразів визначаються оновлені координати точок каркасу, що змінилися під впливом віртуальної системи управління [9].

2.2 Комп'ютерних симулятор Coppeliasim (V-REP)

Цей пакет є, за словами творців, швейцарським армійським ножом серед інших систем симуляції роботів, що, ймовірно, є спробою підкреслити багатofункціональність даного комплексу.

Розробники заявляють, що неможливо знайти симулятор з великою кількістю функцій, опцій або дружнім інтерфейсом прикладного програмування (API).

Симулятор V-REP, з інтегрованим середовищем розробки, базується на розподіленій архітектурі управління: кожен об'єкт/модель може контролюватись індивідуально за допомогою вбудованого скрипта, розширення, клієнта API, вузла ROS (Robot Operating System) або самостійного рішення. V-REP використовується для швидкої розробки алгоритмів, симуляції промислової автоматизації, створення прототипів та верифікації, навчання, віддаленого моніторингу, подвійної перевірки безпеки та багато іншого. Інтерфейс симулятора V-REP представлений рисунком 2.3 [10].

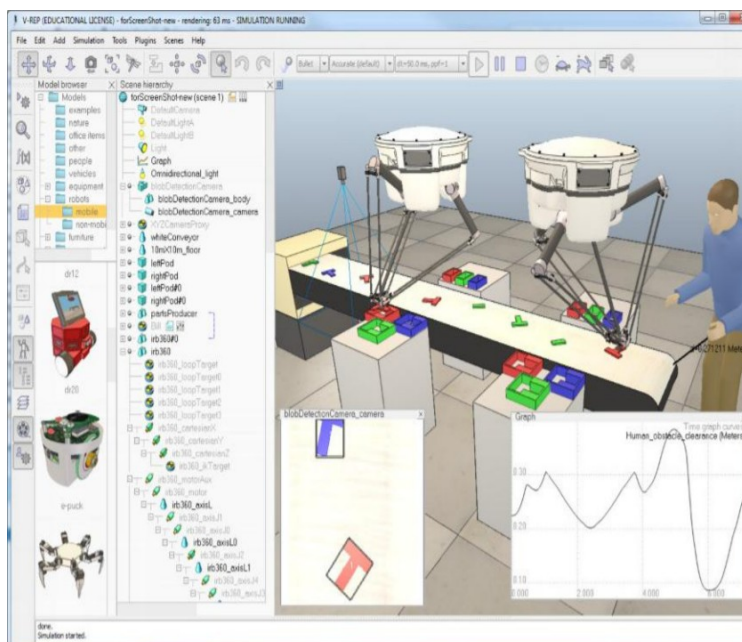


Рисунок 2.3 – Робоче вікно комплексу симуляції V-REP

Серед переваг цього пакета можна перерахувати: шість різних підходів програмування. Процеси симуляції повністю настроюються, з шістьма можливими підходами програмного управління, здатними працювати спільно.

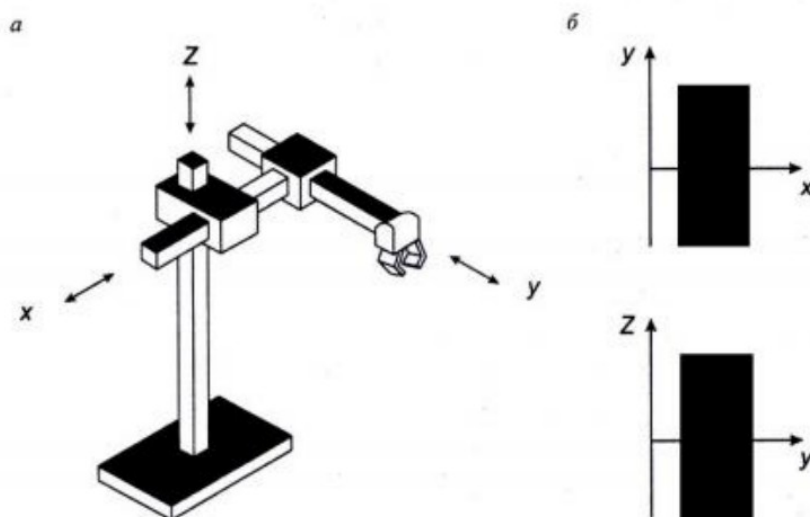
2.3 Визначення робочої зони маніпулятора та координат маніпулятора

Робоча зона є точки простору, які досягаються робочим органом. Форма робочої зони визначається кінематичною схемою маніпулятора, а її розміри – розмірами ланок маніпулятора та розмірами приводів.

Визначаємо розміри приводів маніпулятора. Як привод у маніпуляторі використовується циліндр двосторонньої дії, який забезпечує поступальне переміщення поршня в одному з двох протилежних напрямків. Циліндр і поршень природно складають кінематичну пару, елементи якої з'єднані поступальним зчленуванням. У пневматичному приводі рушійне зусилля створюється повітрям, що нагнітається під тиском. Повітря змушує поршень рухатися прямолінійно щодо циліндра.

Визначення системи координат маніпулятора. Існує велика кількість схем маніпуляторів, що реалізують переміщення своїх ланок у просторі, але найпоширенішими є такі типи маніпуляторів:

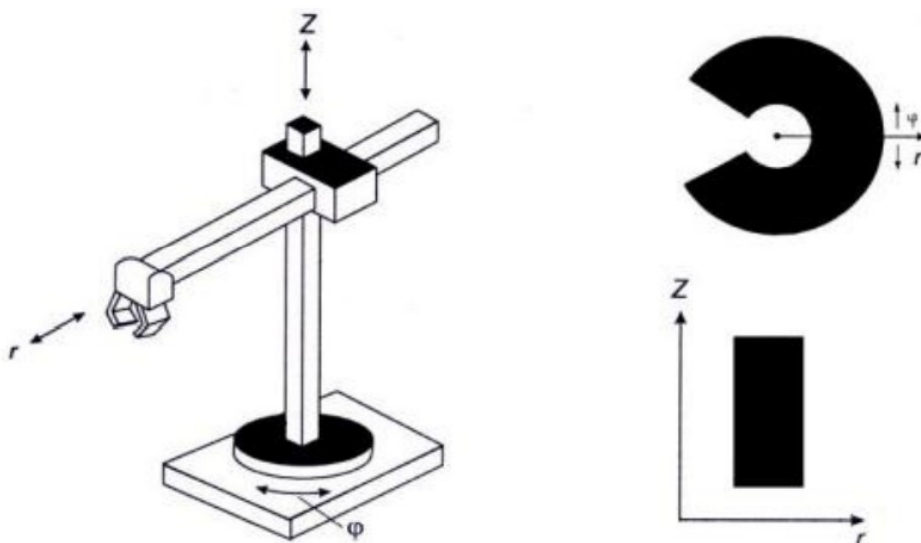
Маніпулятор декартового типу. Маніпулятори, які функціонують у прямокутній (декартовій) системі координат (рисунок 2.4, а) прості в управлінні та відрізняються високою точністю дій та мають робочу зону у формі паралелепіпеда (рисунок 2.4, б). Робочий орган таких маніпуляторів переміщається вздовж трьох основних осей: x , y та z – лише поступово.



а – маніпулятор із декартовою системою координат; б – його робоча зона

Рисунок 2.4 – Маніпулятор, який працює у декартовій системі координат

Маніпулятор циліндричного типу. У маніпуляторах, які функціонують у циліндричній системі координат (рисунок 2.5 а) кутове переміщення відбувається спільно з поступальними рухами. У таких маніпуляторах захоплення переміщається вгору і вниз уздовж стійки, і вміє висуватися і втягуватися, а весь вузол маніпулятора може повертатися навколо осі основи. Робоча зона (рисунок 2.5 а) обмежена циліндричними поверхнями.



а – маніпулятор із циліндричною системою координат; б – його робоча зона

Рисунок 2.5 – Маніпулятор, який працює в циліндричній системі координат

Сферичний маніпулятор. Маніпулятори, що діють у сферичній (або полярній) системі координат (рисунок 2.6 а) виробляють два кутових переміщення, а їх робоча зона (рисунок 2.6 б) обмежена сферичними поверхнями. Захоплення такого маніпулятора може висуватися та втягуватися. Вертикальні переміщення маніпулятора досягаються шляхом повороту його у вертикальній площині у плечовому суглобі. Весь вузол маніпулятора може повертатися навколо осі основи. Маніпулятори зі сферичною системою координат складніші за циліндричну систему, але при цьому виглядають компактніше.

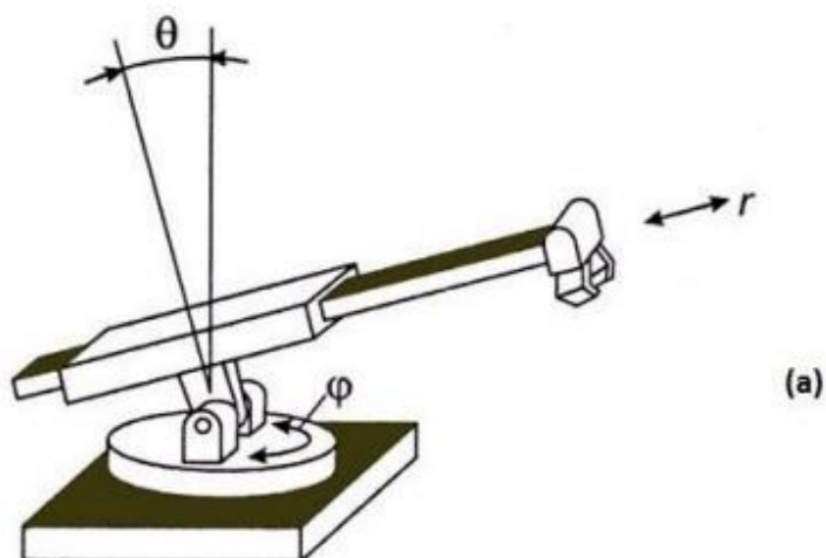


Рисунок 2.6 а – Маніпулятор, який працює у сферичній системі координат

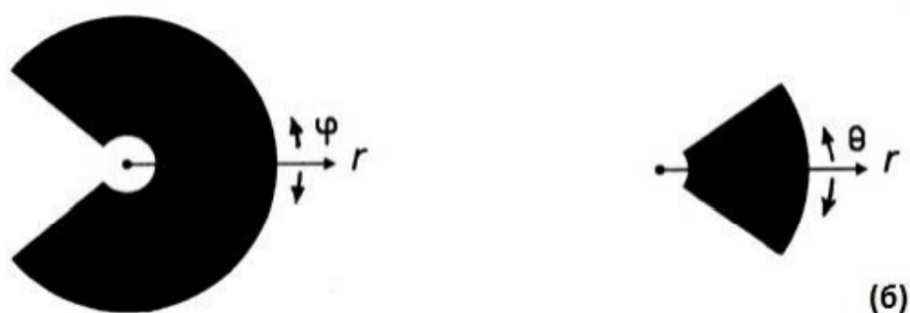
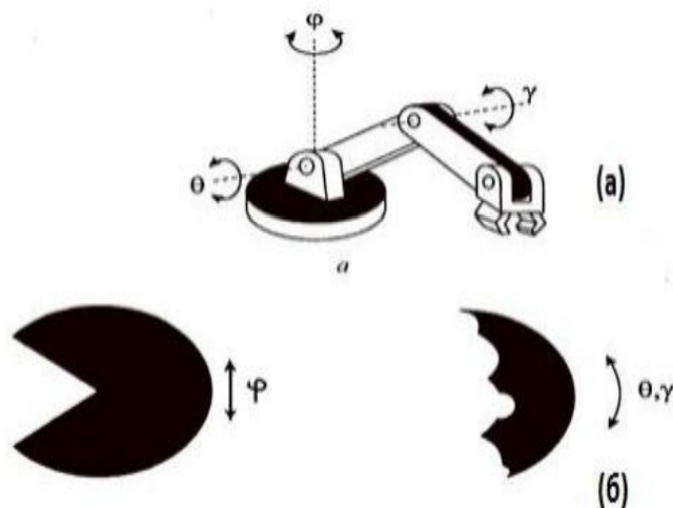


Рисунок 2.6 б – Робоча зона маніпулятора, що працює у сферичній системі координат

Маніпулятор ангулярного типу. Маніпулятор з кутовою (ангулярною) системою координат (рисунок 2.7 а) не має поступальних кінематичних пар і переміщається завдяки кутовим переміщенням, а всі поворотні ланки являють собою шарніри. Подібні маніпулятори можуть працювати швидше, ніж декартові, а також мають найбільшу компактність і мають здатність складатися в межах своїх габаритів. А зона обслуговування значно більша, ніж у маніпуля-

торів інших типів і він здатний вирішувати складніші завдання, але разом з тим він виключно складний в управлінні.



а – маніпулятор із ангулярною системою координат; б – його робоча зона

Рисунок 2.7 – Ангулярний маніпулятор

Мною був обраний маніпулятор ангулярного типу, оскільки в даній роботі була потрібна компактність і вміння складатися в межах своїх габаритів, також даний тип має відповідну робочу зону і можливість повертатися навколо осі основи. Кількість ступенів рухомості, багатоланковий маніпулятор – це маніпулятор, який має кілька ступенів рухливості. Тіло має n ступенів рухливості, якщо воно здатне здійснювати n різних незалежних видів переміщень. На рисунку 2.8 показані приклади кінематичних пар, що мають один ступінь свободи. Наприклад, обертання циліндричного шарніра навколо власної осі та зворотно-поступальні рухи вздовж осі. Дві та більше свободи мають кінематичні пари, наведені на рисунку 2.9.

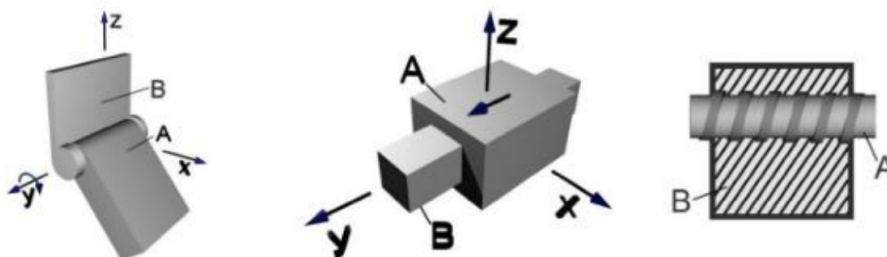


Рисунок 2.8 – Однорухливі кінематичні пари

– обертальна (рисунок 2.8, а) – циліндричний шарнір. Тут накладено п'ять умов зв'язку, тобто. виключені всі рухи крім обертального;

– поступальна (рисунок 2.8, б) – накладено п'ять умов зв'язку, тобто. виключені всі рухи крім одного поступального;

– гвинтова (рисунок 2.8, в) – накладено тут п'ять умов зв'язку, тобто. виключені всі рухи крім поступального (у разі обертання перестав бути ступенем свободи, оскільки поступальний і обертальний руху не незалежні).

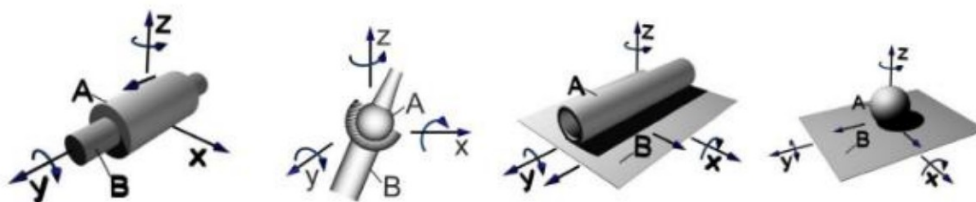


Рисунок 2.9 – Кінематичні пари

Пара дворухлива (рисунок 2.9 а) – втулка на валику. Тут накладено чотири умови зв'язку – вздовж осей OX та OZ виключені поступальні та обертальні рухи.

Пара трирухлива (рисунок 2.9, б) – кульовий циліндр. Тут накладено три умови зв'язку: вздовж усіх трьох осей виключено поступальні рухи.

Пара чотирирухлива (рисунок 2.9, в) – циліндр на площині. Тут накладено дві умови зв'язку: вздовж осі OZ виключено поступальний рух, а навколо осі OX – обертальне.

Пара п'ятирухлива (рисунок 2.9, г) – куля на площині. Тут накладено одну умову зв'язку: вздовж осі OZ виключено поступальний рух.

Число ступенів рухливості маніпулятора визначається кількістю ступенів свободи кінематичного ланцюга щодо стійки, тобто. ланки, прийнятої умовно за нерухоме. У відкритих кінематичних ланцюгах, яких відносять маніпулятори, число рухливих ланок n завжди дорівнює числу кінематичних пар p .

Ступінь рухливості механізму W – це необхідна для одного обороту кількість незалежних рухів, які потрібно підвести до механізму.

Формула для розрахунку ступеня рухливості плоских механізмів:

$$W = 3n - 2p_1 - p_2 \quad (3.1)$$

де n – число рухомих ланок механізму;

p_1 – число однорухливих кінематичних пар;

p_2 – число дворухливих кінематичних пар.

Ступінь рухливості маніпулятора 3.1, що розглядається, з трьома рухомими ланками, і трьома однорухомими кінематичними парами, обчислена за формулою 3.1 буде дорівнювати:

$$W = 3n - 2p_1 - p_2 = 3 \times 3 - 2 \times 3 = 3 \quad (3.2)$$

Кількість ступенів рухливості визначає функціональні можливості маніпулятора. За своїми можливостями три ступені рухливості дають маніпулятор практично можливості руки людини, а захоплення можна порівнювати з пензлем. Переміщення маніпулятора в просторі вздовж будь-якої з координат (рисунок 2.10) визначає ступінь свободи і забезпечується серводвигунами, які

встановлені в місцях зчленування маніпулятора або за допомогою зворотного зв'язку через тяги.

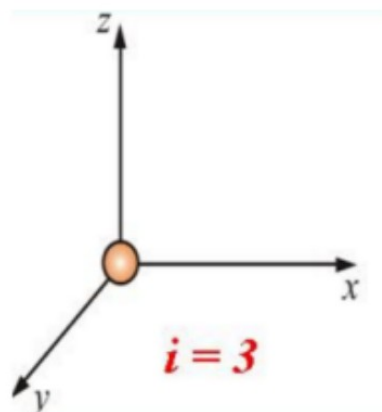


Рисунок 2.10 – Ступені свободи маніпулятора

Робочий простір промислового робота – це простір, у якому робочий орган (наприклад, схоплення) мехатронного пристрою може бути.

Розрізняють плоский та просторовий робочий простір. Тип робочого простору визначає число ступенів свободи та характер відносин між кінематичними парами маніпулятора.

Робочою зоною плоского маніпулятора є фігура, окреслена множиною гранично можливих положень центру схоплення або його граничною траєкторією.

Далі ми розглядатимемо робочу зону нашого маніпулятора, який працює в ангулярній системі координат. Робоча зона маніпуляторів такого типу представлена рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – Робоча зона маніпулятора, що працює в ангулярній системі координат

Завдання кінематичного дослідження.

Для опису кінематики руху існують дві основні задачі: пряме та зворотне. Оскільки необхідно обчислити граничне становище схоплення, ми розглянемо лише пряме завдання – тобто. обчислимо положення робочого органу маніпулятора за його кінематичною схемою та значенням узагальнених координат.

Таким чином, рішення прямого завдання покаже нам позицію робочого органу маніпулятора, при заданих кутах його суглобів.

Розробляється математична модель (рисунок 2.12) у формі розрахунку кінематичних характеристик, яка полягає у вказівці довжин ланок, кількості та розподілу кінематичних пар. Положення точок у просторовому кінематичному ланцюгу визначається за допомогою узагальнених координат, які можуть характеризувати відносні переміщення як поступальних, так і обертальних кінематичних пар.

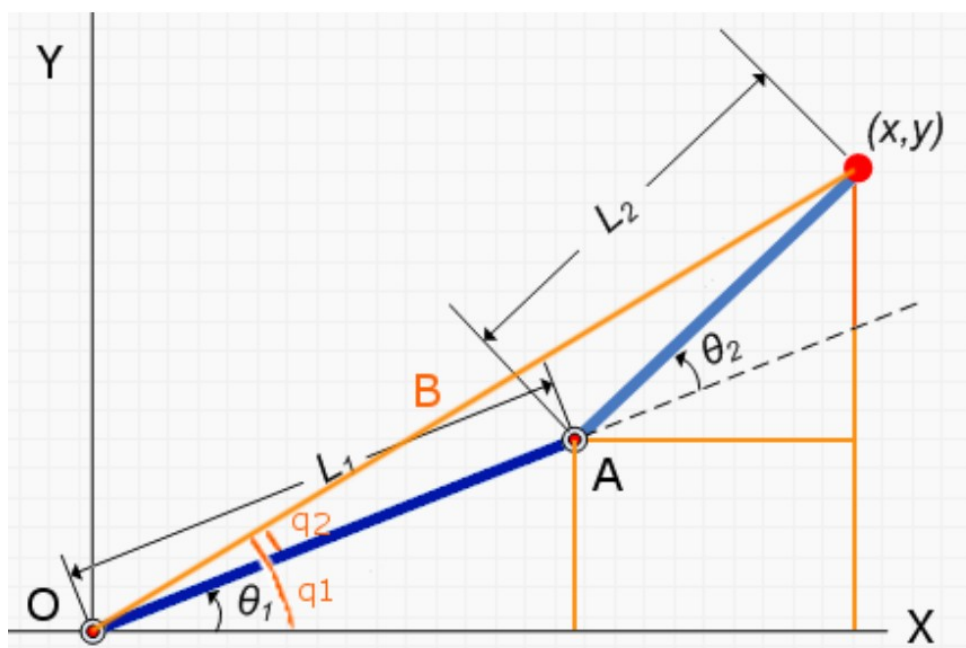


Рисунок 2.12 – Розрахункова математична модель

Вирішення прямої задачі кінематики дозволяє знайти координати робочого органу (x, y) робота-маніпулятора з ангулярною системою координат за заданими L_1 , L_2 , q_1 , q_2 . Формули для вирішення прямого завдання:

$$\begin{aligned} x &= X_A + x' = L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2) \\ y &= Y_A + y' = L_1 \sin(q_1) + L_2 \sin(q_1 + q_2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

З допомогою даних рівнянь і вирішується пряме завдання становищі робота-маніпулятора у просторі, і навіть вони є основою кінематичних досліджень маніпуляторів промислових роботів. Звідси випливає, що пряме завдання розраховує геометричні характеристики робочої зони робота при врахуванні особливостей конструкцій маніпулятора та розмаху переміщення точок ланок механізму під дією заданих сил.

Розв'язавши пряме завдання, за допомогою формули 2.2, ми отримаємо значення координат, які називають характерною точкою захватного пристрою:

$$\begin{aligned} x &= X_A + x' = 165 \text{ мм} \cdot \cos(12^\circ) + 205 \text{ мм} \cdot \cos(12^\circ + 42^\circ) = 338 \text{ мм} \\ y &= Y_A + y' = L_1 \sin(q_1) + L_2 \sin(q_1 + q_2) = -68 \text{ мм} \end{aligned}$$

Вочевидь, що ланки розроблюваного робота-маніпулятора розташовуються інакше, ніж на рисунку 2.12, отже формула не зміниться, але зміняться знаки кутів треба брати з протилежним знаком.

Негативне значення (висоти) пояснюється тим, що схоплення робота маніпулятора в крайньому положенні знаходиться нижче за основу.

Отримана характерна точка повністю відповідає робочому простору та відстані між компонентами, що розглядається лабораторним стендом (рисунки 2.13). А це означає, що захватний пристрій робота маніпулятора, що знаходиться на рухомій платформі, здатне захоплювати і переносити ліки до точки вивантаження.

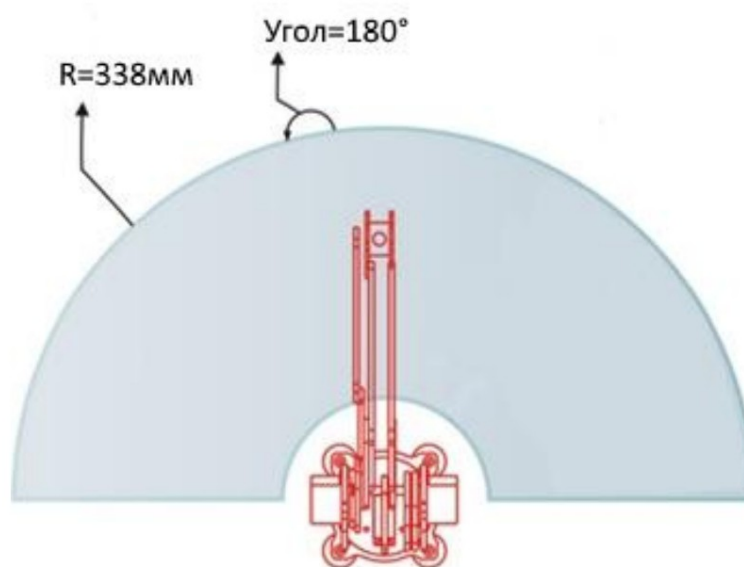


Рисунок 2.13 – Розрахунковий граничний радіус маніпулятора

2.4 Опис захватного пристрою

Захоплювальним пристроєм (далі ЗП) промислового робота називається його робочий орган, що безпосередньо взаємодіє з об'єктом маніпулювання, і призначений для його захоплення та утримання у певному положенні та з

певною орієнтацією. Дані об'єкти можуть мати різну форму, розмір, масу, а також мати різні фізичні властивості, які вимагають використовувати ЗП різного призначення. Найчастіше використовується різновид захватного пристрою – схват. Це пристрій, яке здійснює захоплення та утримання об'єкта маніпулювання за допомогою переміщення в межах власної осі координат механічних частин цього пристрою. Схоплення за своєю конструкцією імітує пристрій кисті людини: з механічного погляду захоплення об'єкта досягається рахунок особливої ролі пальців. Захоплювальні пристрої, якими оснащуються промислові роботи, істотно розширює сферу їх застосування, а також дозволяють здійснити швидке переналагодження для можливого виконання різних операцій. З цієї причини аналіз конструкцій, класифікація захватних пристроїв, розробка методики їх вибору, розрахунку та проектування мають дуже важливе значення.

У ЗП є загальні та спеціалізовані, пов'язані з певними умовами діяльності. До подібних запитів відносяться: надійність захоплення та утримання деталі, неприйнятність пошкодження чи руйнування деталі, стабільність базування. Також має вагу міцність ЗП при малих габаритах та водночас ваги.

Елемент захватного пристрою, що входить у контакт безпосередньо з об'єктом маніпулювання, називається робочим елементом. Крім того, з терміном робочий елемент у літературі застосовуються антропоморфні терміни: губки, пальці, щелепи та ін.

Основні технічні характеристики ЗП: номінальна вантажопідіймальність, зусилля захоплення, гранично допустимі значення прикладених сил та моментів по осях системи координат ЗП, час захоплення та час відпускання, маса, габаритні, показники надійності тощо.

Дія захоплення в стандартах не обумовлюється. У схопленнях зусилля, з яким захоплюється об'єкт створюється приводом, що переміщає робочі елементи до контакту з поверхнею цього об'єкта.

Час захоплення – час, який потрібно захоплення заняття стійкого становища перед об'єктом маніпулювання з значенням зусилля захоплення. Під

часом відпускання мається на увазі час від подачі керуючого сигналу на відпускання до розкриття схоплення.

Номінальною вантажопідйомністю ЗП називається найбільше допустиме значення маси утримуваного об'єкта. Реальна маса утримуваного об'єкта не повинна перевищувати вантажопідйомність, за якої гарантуються його захоплення та утримання із заданими умовами.

Граничні допустимі значення прикладених зусиль (моментів) – це найбільша сила, прикладена до об'єкта (на початку системи координат захватного пристрою), у яких об'єкт утримується ЗП.

Класифікація схватів.. Різноманітність ознак серед ЗП, що характеризують конструктивні різновиди придатних для вирішення схожих завдань та особливості їх конструктивно-технологічного застосування, не дозволяють побудувати класифікацію за суто ієрархічним принципом.

Захватні пристрої за принципом дії поділяються на:

- затискними (схоплюючими) ЗП називають пристрої, що впливають на об'єкт за допомогою робочих елементів: губок, пальців, кліщів і т.п. Утримання об'єкта відбувається за рахунок сил тертя, що виникають при затиску, або комбінації сил тертя та зусиль, що замикають. Затискні ЗП бувають механічними – кліщі, лещата, шарнірні пальці, і з еластичними робочими елементами – камерами, що деформуються під дією стиснутого повітря або рідини, що нагнітається всередину;

- підтримуючі ЗП для утримання використовують нижні поверхні об'єкта, виступаючі елементи або отвори, що є в тілі. Наприклад, різні гаки, петлі, вилки та лопатки, що не затискають під час переміщення заготівлю;

- притяжні (утримують) ЗП здатні надавати на об'єкт силовий вплив, використовуючи різні фізичні ефекти. Найбільш поширені вакуумні та магнітні.

Захоплювальні пристрої за характером базування об'єкта поділяються на:

- ЗП, які здатні перебазувати об'єкт і змінювати положення деталі, що захоплюється, за допомогою змінюваних дій робочих елементів. Подібна

властивість мають тільки захватні пристрої антропоморфного виду з пальцями, що регулюються, мають шарнірну конструкцію;

- центруючі ЗП визначають положення осі або площини симетрії об'єкта, що захоплюється. До подібних ЗП відносять механічні, оснащені губками як призми тощо;

- базуючими називають ЗП, здатні визначати розташування базових поверхонь. Подібний вигляд характерний для ЗП, що підтримують;

- фіксуючі ЗП здатні зберігати початкове положення об'єкта маніпулювання під час заданих переміщень.

Залежно від призначення ЗП (у складальних ПР, наприклад) додатково оснащуються пристроями, що виконують переміщення, що орієнтують. ЗП застосовуються з пристроями, що виконують деякі технологічні операції.

Залежно від кількості робочих позицій ЗП бувають однопозиційні та багатопозиційні. За характером виконуваної роботи багатопозиційні ЗП поділяються на три підгрупи: ЗП послідовної дії, паралельної та комбінованої.

Пристрої послідовної дії – це часто двопозиційні пристрої, які мають завантажувальну та розвантажувальну позиції, що виконуються. Задіяні у роботі елементи кожної з позицій працюють незалежно.

У ЗП паралельної дії є ряд виконавчих позицій для одночасного захоплення або відпускання групи деталей. ЗП комбінованої дії оснащені групами з кількох паралельно діючих виконавчих позицій, і ці групи незалежно один від одного наводяться в дію.

ЗП за видом управління поділяються на чотири групи:

- некеровані ЗП. Пристрої такого типу містять у своєму складі постійні магніти, вакуумні присоски, відсутність примусового розряджання та інше. Для зняття з них захопленого об'єкта потрібна більша сила, ніж для його утримання;

- командні ЗП. Ці пристрої керуються командами для захоплення або відпускання об'єкта. Такими ЗП є, зокрема, пристрої з пружинним або пневмоприводом і пристроями, що стопорять, спрацьовують через заданий період ча-

су. Затискач і розтискання губок здійснюється завдяки взаємодії з елементами зовнішнього обладнання або об'єктом маніпулювання;

- жорсткопрограмовані ЗП. Пристроями цього керує система програмного управління. Різні параметри, такі як величина розкриття губок або їх закриття, взаємне розташування різних робочих елементів і сила стиснення затиску в ЗП такого типу змінюються в залежності від заданої керуючої програми, яка також може контролювати і дії допоміжних пристроїв;

- адаптивні ЗП. ЗП цього типу є програмованими пристроями, вони оснащені датчиками зворотного зв'язку, що визначають силу стиснення, форму і масу об'єкта, що маніпулюється, прослизання його щодо різних робочих елементів ЗП і багато іншого.

За способом кріплення до руки промислового робота всі ЗП можна поділити на чотири групи:

- незмінні ЗП – це невід'ємна частина конструктивного виконання робота. Зміна таких ЗП не передбачено;

- змінні ЗП. Пристрої такого типу є самостійними вузлами, що мають базові поверхні для кріплення до промислового робота. Такі ЗП не розраховані на їхню швидку зміну через вид їх кріплення;

- швидкозмінні ЗП – це змінні вузли, що кріпляться до промислової роботи базовими поверхнями для забезпечення їхньої швидкої зміни. Прикладом такого ЗП може бути байонетний замок;

- ЗП, придатні для автоматичної зміни – це такі пристрої, конструктивне виконання базових поверхонь яких дає можливість автоматичної зміни на роботі.

Для переміщення ліків була розроблена 3D-модель захватного пристрою (рисунок 2.14), що дозволяє схоплювати та утримувати об'єкт під час переміщення на певні координати. Кліщовий тип захватного пристрою володіє простою конструкцією, малою вартістю і дозволяє легко маніпулювати об'єктами невеликих мас і розмірів.

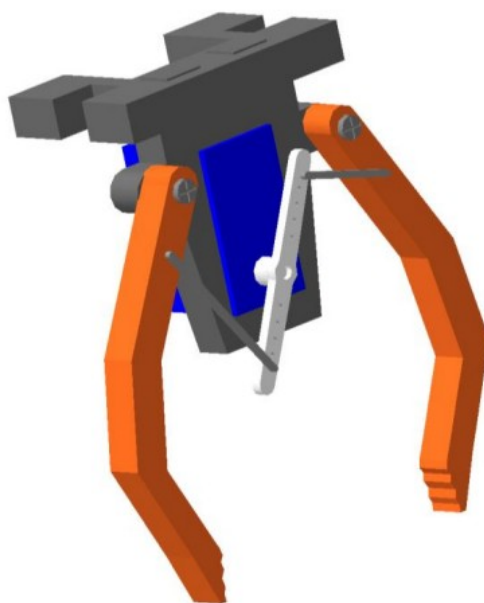


Рисунок 2.14 – 3D-модель обраного захватного пристрою

Захоплення маніпулятора виготовлено з АБС-пластику, що знижує вартість виробництва, і має невелику вагу, отже, знижує навантаження на двигуни, а також має високу стійкість до ударів і еластичність.

Для стиснення/розтискання губок використовується серводвигун з 43 ходом 90 градусів від крайнього за годинною і до крайнього проти годинникової стрілки положення.

2.5 Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто доцільність використання робототехнічних симуляторів. Описано функціонал симулятора V-REP.

Також було розглянуто визначення системи координат маніпулятора, різноманітні типи маніпуляторів, види кінематичних пар. Було визначено робочу зону маніпулятора, та розглянуто вирішення прямого завдання кінематики. Провів аналіз різноманітних захватних пристроїв маніпулятора.

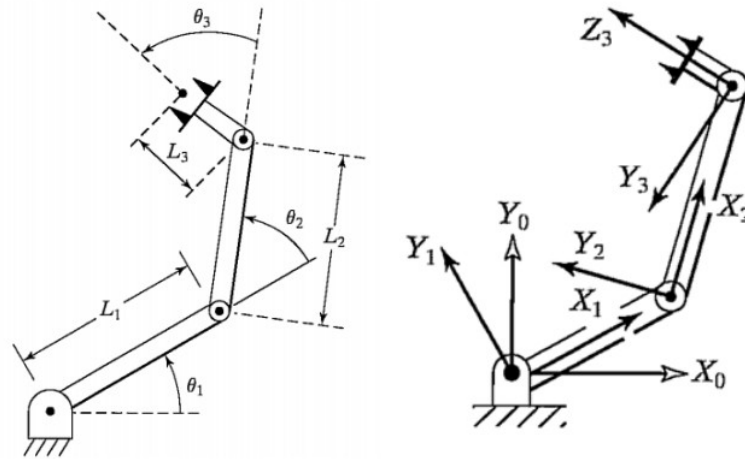
3 ОПИС РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЕКТУ

3.1 Зворотна задача кінематики (ЗЗК)

Зворотна задача кінематики (ЗЗК) полягає у розрахунку набору узагальнених координат маніпулятора при заданих координатах положення та орієнтації кінцевої системи координат, пов'язаної зі захватом або робочим інструментом [11].

Для того, щоб правильно вирішити зворотне завдання кінематики, необхідно мати знання про кінематику робота: довжини ланок, кінематичні пари, характер рухів у них.

Зворотне завдання кінематики набуло великого поширення на різних виробництвах: в реальних умовах інженеру найчастіше відоме місце, куди повинен прийти робочий орган. Але починають зазвичай із запровадження систем координат, пов'язаних із кінематичними парами. Це можна зробити, наприклад, через уявлення Денавіта-Хартенберга. Тут для зручності рішення ЗЗК розглянуто з прикладу плоского триланкового маніпулятора, зображеного рисунку 3.1.



а) Параметри Денавіта-Хартенберга, б) пов'язані з його ланками системи координат [12]

Рисунок 3.1 – Триланковий маніпулятор

Спочатку кожній кінематичній парі (в i -ій КП з'єднуються ланки i і $i - 1$) ставиться у відповідність своя система координат, яка допомагає спростити вирішення зворотного завдання кінематики, з осями, розташованими, як показано на рисунку 3.1(б) [13]. Призначення осей систем координат та отримання параметрів Денавіта-Хартенберга було наведено в таблиці 3.1 з параметрами, отриманими з побудов на рисунку 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри Денавіта-Хартенберга [14]

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	L_1	0	θ_2
3	0	L_2	0	θ_3

Для цього маніпулятора з вирішення прямої задачі кінематики відоме перетворення (тобто набір поворотів та зміщень) робочого органу щодо стійки:

$${}^0_3 T = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_1 * c_1 + l_2 * c_{12} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_1 * s_1 + l_2 * s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

де $s_1 = \sin(\theta_1)$;

$$c_i = \cos(\theta_i) ;$$

$$c_{12} = c_1 c_2 - s_1 s_2 ;$$

$$s_{12} = c_1 s_2 + s_1 c_2 ;$$

$$c_{123} = c_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 c_3 + c_1 c_2 s_3 - s_1 s_2 s_3 ;$$

$l_1 l_2$ довжини ланок 1 та 2 відповідно.

$${}^0_3 R = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 \\ s_{123} & c_{123} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{— матриця обертання, що показує орієнтацію робочого}$$

органу,

$${}^0_3 P = \begin{bmatrix} l_1 * c_1 + l_2 * c_{12} \\ l_1 * s_1 + l_2 * s_{12} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{— вектор положення, що показує зсув робочого органу}$$

щодо стійки.

Для зручності рішення 3ЗК назовемо кінцеве перетворення робочого органу (3.1) перетворенням від стійки до кінцевої точки робочого органу ${}^C_P T$:

$${}^C_P T = \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi & 0 & x \\ s_\varphi & c_\varphi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

де кут φ описує орієнтацію робочого органу;

а x та y — його положення щодо стійки [14].

Алгебраїчний підхід до рішення 3ЗК полягає у складанні рівнянь для знаходження кута φ , що описує орієнтацію робочого органа.

Якщо прирівняти (3.1) і (3.2), можна побачити чотири рівняння, які необхідні для реалізації підходу алгебри:

$$c_{\varphi} = c_{123}, \quad (3.3)$$

$$s_{\varphi} = s_{123}, \quad (3.4)$$

$$x = l_1 * c_1 + l_2 * c_{12}, \quad (3.5)$$

$$y = l_1 * s_1 + l_2 * s_{12} \quad (3.6)$$

Зведемо в квадрат і складемо рівняння (3.5) та (3.6):

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2c_2, \quad (3.7)$$

Виразимо з (3.7) значення c_2 і отримаємо:

$$c^2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}, \quad (3.8)$$

Для того щоб рішення входило в робочу зону маніпулятора, необхідно праву частину рівняння (3.8) шукати в діапазоні від 1 до -1 (тому що $c_2 = \cos(\theta_2)$), який існує лише між -1 та 1).

Тоді, виходячи з основного тригонометричного тотожності, можна написати вираз для s_2 :

$$s_2 = \sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - c_2^2}, \quad (3.9)$$

Кут θ_2 можна визначити через $\arctg$:

$$\theta_2 \arctg \left(\frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} \right) = A \tan 2(s_2 c_2), \quad (3.10)$$

Далі необхідно отримати вираз для кута θ_1 . Для початку перетворюємо (3.5) – (3.6) для зручності:

$$\begin{aligned} x &= l_1 c_1 + l_2 c_{12} = l_1 c_1 + l_2 c_1 c_2 - l_2 s_1 s_2 = \\ &= c_1 (l_1 + l_2 c_2) - s_1 (l_2 s_2) = c_1 k_1 - s_1 k_2, \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} y &= l_1 s_1 + l_2 s_{12} = l_1 s_1 + l_2 c_1 s_2 - l_2 s_1 c_2 = \\ &= s_1 (l_1 + l_2 c_2) - c_1 (l_2 s_2) = s_1 k_1 - c_1 k_2, \end{aligned} \quad (3.12)$$

Якщо ввести заміну:

$$\begin{aligned} r &= \pm \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \\ \gamma &= A \tan 2(k_2, k_1) = \arctg\left(\frac{k_2}{k_1}\right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

то можна записати змінні k_1 і k_2 як:

$$k_1 = r \cos \gamma \quad (3.13)$$

$$k_2 = r \sin \gamma \quad (3.14)$$

Тепер рівняння (3.11) – (3.12) можна переписати у новому вигляді:

$$\frac{x}{r} = \cos \theta_1 \cos \gamma - \sin \theta_1 \sin \gamma, \quad (3.15)$$

$$\frac{y}{r} = \sin \theta_1 \cos \gamma - \cos \theta_1 \sin \gamma, \quad (3.16)$$

Використовуючи тригонометричні формули для суми двох кутів, знайдемо:

$$\cos(\theta_1 + \gamma) = \frac{x}{r} \quad (3.19)$$

$$\sin(\theta_1 + \gamma) = \frac{y}{r} \quad (3.18)$$

Тут рішення можна знову знайти через *arctg*:

$$\theta_1 + \gamma = \arctg\left(\frac{\sin(\theta_1 + \gamma)}{\cos(\theta_1 + \gamma)}\right) = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) = A \tan 2(y, x) \quad (3.19)$$

Звідси, маючи на увазі (3.13), знайдемо кут θ_1 :

$$\theta_1 = A \tan 2(y, x) - A \tan 2(k_2, k_1) \quad (3.20)$$

Тепер із (3.3) – (3.4) можна за допомогою *arctg* знайти кут φ :

$$\varphi = A \tan 2(s_\varphi, c_\varphi) = \arctg\left(\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}\right) = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (3.21)$$

У випадку з 3ЗК ми знатимемо кут φ і завданням буде знайти кут γ по двох отриманих кутах θ_1 і θ_2 [15].

Геометричний підхід відрізняється від алгебраїчного лише способом реалізації, як правило, його значно легше використовувати. Сенс геометричного підходу полягає в тому, щоб побачити у просторовому зображенні маніпулятора плоскі фігури та вирішити за допомогою простої геометрії.

Спочатку звернемо увагу на рисунок 3.2, де показано, що наш триланковий маніпулятор формує відносно стійки трикутник зі сторонами L_1 і L_2 , кут між ними θ_2 , а пунктирними лініями позначено інше розташування ланок, у якому робочий орган потрапить у таку саму точку. Відстань від стійки до робочого органу є гіпотенуза обох трикутників, яку можна знайти за теоремою косінусів:

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos(180 + \theta_2) \quad (3.22)$$

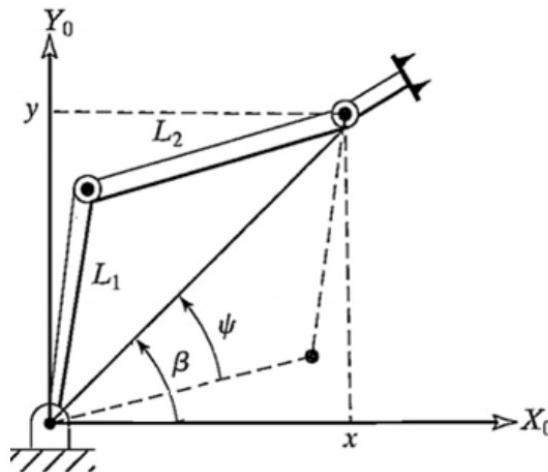


Рисунок 3.2 – Геометричні побудови для триланкового маніпулятора [15]

Враховуючи що $\cos(180 + \theta_2) = -\cos \theta_2$, із (3.22) висловимо c_2 :

$$c_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (3.23)$$

Тут, як і в підході алгебри, необхідно помітити, що для того, щоб мета опинялася в межах робочої зони маніпулятора, потрібно вирішувати рівняння (3.23) у межах від -1 до 1. І тому можна прирівняти чисельник і знаменник. Тоді вийде, що відстань до мети $\sqrt{(x^2 + y^2)}$ має бути менше або дорівнює сумі довжин ланок $l_1 + l_2$.

Кут β можна знайти за допомогою $\arctg$:

$$\beta = A \tan 2(y, x) = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.24)$$

а кут ψ по теоремі косинусів:

$$\cos \psi = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{(x^2 + y^2)}} \quad (3.25)$$

Щоб геометрія зберігалася, необхідно змінювати кут у межах $0 \leq \psi \leq 180^\circ$. Тепер, виходячи з побудов рисунку 3.2, знайдемо кут θ_1 (це кут між віссю x_0 та ланкою L_1):

$$\theta_1 = \beta \pm \psi, \quad (3.26)$$

де знак плюс буде у разі $\theta_2 < 0$;

а знак мінус – при $\theta_2 > 0$.

У зв'язку з тим, що ми знаходимося в площині, орієнтацію робочого органу можна знайти як суму всіх кутів θ_i [16]:

$$\varphi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (3.27)$$

У рішенні 3ЗК два описані підходи можуть поєднуватися для отримання цілісного рішення, особливо якщо маніпулятор має більшу кількість ланок [16].

3.1.1 Проблеми вирішення 3ЗК та запропоновані рішення

У результаті рішення 3ЗК можуть виникнути деякі труднощі. По-перше, універсального рішення 3ЗК немає: для кожного виду маніпулятора необхідно підбирати найбільш вдалий спосіб рішення. По-друге, рішень 3ЗК може бути кілька, оскільки однієї й тієї ж становища робочого органу у просторі можна досягти різними змінами робота. По-третє, необхідно враховувати, що якщо координати положення робочого органу заздалегідь не прораховані, можна потрапити за межі робочої зони робота.

Перша проблема особливість дозволяється так: виконується підбір потрібного методу залежно від конструкції робота. Деякі способи вирішення ЗЗК інтегровані у програмні засоби.

Друга особливість рішення ЗЗК дозволяється підбором з усіх отриманих конфігурацій робота оптимальною за витратами енергії, швидкості досягнення або іншим характеристикам, які є важливими для конкретного випадку.

Третя проблема часто виключається під час планування руху робота, тобто. при відпрацюванні чи налагодженні програми руху. Якщо, наприклад, у середовищі моделювання робота програма перестає працювати коректно, то на реальному виробництві виникне помилка та потреба у техніці, який повинен буде миттєво налагодити програмний код. Цієї проблеми не існує, наприклад, для роботів, що навчаються, рух яких задається безпосередньо рукою людини.

3.1.2 Рішення ЗЗК для маніпулятора NiryoOne в середовищі CoppeliaSim

Як маніпулятор для модифікації Festo Robotino було обрано маніпулятор від Швейцарської компанії NiryoOne, для якого в цьому розділі буде розглянуто рішення ЗЗК та зроблено візуалізацію його роботи в середовищі моделювання CoppeliaSim.

3.1.3 Структурний аналіз

Структурний аналіз полягає у визначенні ступеня рухливості механізму, але, крім цього, передбачає побудову схеми механізму, розбір доступних рухів у кожній кінематичній парі, на цій стадії можна доопрацювати недоліки будови механізму.

Для подальшої роботи потрібно знати такі поняття.

Число ступенів свободи механічної системи (ступінь рухливості) – це кількість незалежних можливих переміщень.

Зв'язок пасивний – зв'язок у механізмі, видалення якого не змінює характер руху механізму в цілому.

Зв'язок надлишковий – пасивний зв'язок у механізмі, видалення якого не призводить до зниження його якісних показників [17].

Кривошип – це ланка, пов'язана зі стійкою, що здійснює повний обертальний рух.

Шатун – це ланка, пов'язане, як правило, з двома рухомими ланками і виконує складний рух [17].

Коли необхідно дізнатися, як рухається механізм, чи доцільними є саме такі кінематичні пари, побачити, чи немає надлишкових зв'язків, має місце проведення структурного аналізу.

На рисунку 3.3 показані всі доступні рухи ланок промислового маніпулятора NiryoOne.

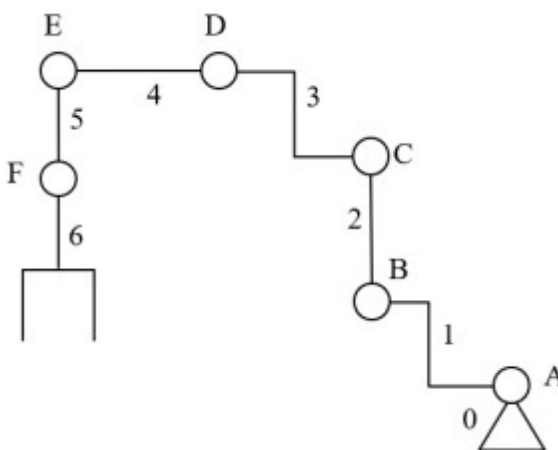


Рисунок 3.3 – Кінематична схема NiryoOne

У ході структурного аналізу визначаються надлишкові зв'язки, яких можна позбутися, але в цьому механізмі їх немає.

Клас кінематичної пари визначається кількістю недоступних рухів (зв'язків): якщо в кінематичній парі одна ланка щодо іншої може здійснювати лише один рух, це означає, що клас такої кінематичної пари п'ятий. Максимально доступна кількість рухів – шість, такий клас кінематичної пари означатиме, що ланки жодним чином не поєднуються, що суперечить визначенню кі-

нематичної пари, а отже, максимальний клас, доступний для кінематичної пари – перший.

Таблиця 3.2 – Кінематичні пари

КП	Ланки, що входять до КП	Выполняемыеаа дія	Тип КП	Клас КП
A	Стійка 0, кривошип 1	Одне оберতальне	Однорухлива оберতальна	P_5
B	Кривошип 1, шатун 2	Одне оберতальне	Однорухлива оберতальна	P_5
C	Шатун 2, шатун 3	Одне оберতальне	Однорухлива оберতальна	P_5
D	Шатун 3, шатун 4	Одне оберতальне	Однорухлива оберতальна	P_5
E	Шатун 4, шатун 5	Одне оберতальне	Однорухлива оберতальна	P_5
F	Шатун 6, шатун 7	Одне оберতальне	Однорухлива оберতальна	P_5

Підрахунок ступеня рухливості механізму здійснюється за формулою Со-мова Малишева для просторових механізмів:

$$W = 6n - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1 \quad (3.28)$$

де n – число рухомих ланок, P_i – кінематична пара відповідного класу

Підставляючи значення $n=6$, $P_5=6$ у формулу (4.1), отримаємо: $W=6*6-5*6=6$. Це означає, що для робочого органу маніпулятора NiryoOne доступні всі можливі просторові рухи.

У подальшій роботі інформація про кінематичні пари і ланки, використовується для моделювання їх рухів, а так як число ступенів рухливості означає кількість ланок, яким потрібно задати рух, щоб визначити положення механізму в цілому [18], воно допомагає зрозуміти, що в даному випадку для визначення становища робочого органу необхідно взяти до уваги рух усіх ланок.

3.2 Розробка у CoppeliaSim

Вирішення зворотного завдання кінематики серед CoppeliaSim може проводитися двома способами: через взаємодію Космосу з графічним інтерфейсом і програмування в скриптах.

Перший спосіб розробники CoppeliaSim рекомендують використовувати у складних ситуаціях, наприклад, для роботів з паралельною кінематичною структурою (РКМ – parallel kinematics machines) [18].

Але другий спосіб застосовується для моделювання у випадку з NiryOne. Сенс його в тому, щоб кінцева точка маніпулятора побачила ціль і почала рухатися разом з нею однією траєкторією. Вирішення зворотної задачі кінематики, фактично, виявляється у синхронності руху кінцевої точки маніпулятора та мети. Досягнення цього у програмі задається рух мети, а робочий орган із нею пов'язується у вигляді батьківських відносин, які задаються у коді програми.

CoppeliaSim 33К може вирішуватися чисельними методами, наприклад, методом найменших квадратів, який можна вибрати в інтерфейсі програми.

У каталозі CoppeliaSim модель NiryOne складається з шести КП (`NiryOne_joint№`), кожна з яких пов'язана батьківськими стосунками з однією з шести ланок (`NiryOne_link№`) відповідно, що виключає необхідність задавати довжини ланок у коді програми. напевно, були враховані при створенні моделі). Окремо задаються кінцева точка маніпулятора (`NiryOne_IkTip`), ціль (`NiryOne_IkTarget`) та допоміжна КП (`NiryOne_auxJoint`). Вся описана вище структура відповідає зазначеній у документах для маніпулятора, що розглядається, вона ж зображена в дереві моделі, показаному на рисунку 3.4.

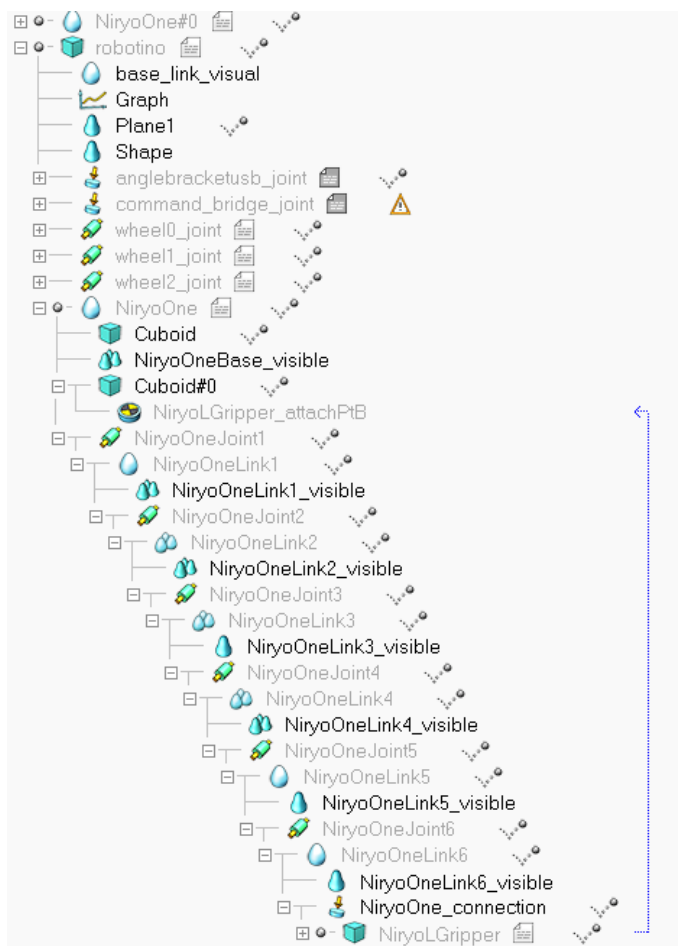


Рисунок 3.4 – Ієрархія частин маніпулятора

Сенс допоміжної кінематичної пари у тому, що це рухи мети задаються щодо неї. До початку симуляції допоміжна КП знаходиться в центрі стійки робота, далі ми побачимо, що в коді будуть задаватися координати цієї КП щодо робота і під час включення частини коду з розрахунком зворотного завдання кінематики протягом симуляції мета буде рухатися саме щодо цієї допоміжної КП.

Виходячи з вищесказаного, нам необхідно задати рух усім ланкам (через кінематичні пари, пов'язані з ними), вказати їх швидкості та прискорення, встановити, що щодо чого і коли буде рухатися.

Формально весь сценарій можна розділити на кілька блоків, зазначених на рисунку 3.5: опис вирішення прямої та зворотної задач кінематики, завдання параметрів всіх КП, включаючи допоміжну, та завдання траєкторії руху мети.



Рисунок 3.5 – Блок-схема моделювання руху кінцевої точки маніпулятора

Далі розглянемо якими функціями все вищезазначене задається. Рядки 1-4 (рисунок 3.6) задають функцію, що описує зворотну кінематику. Тут позначаються об'єкти, для яких необхідно вирішувати ЗЗК (вони об'єднані в `ikGroup`, що створюється у діалоговому вікні `Calculation Module Properties`). Функція `sim.switchThread` дає можливість перемикатися з однієї частини коду до іншої, як би завершуючи поточну.

```

1      setIkMode=function()
2          sim.setExplicitHandling(ikGroup,0)
3          sim.switchThread()
4      end
  
```

Рисунок 3.6 – Фрагмент коду, функція `setIkMode`

Рядки 5-11 (рисунок 3.7) визначають функцію, за допомогою якої реалізується пряма кінематика. Тут функція `sim.setExplicitHandling` відключає обробку зворотної кінематики, функцією `sim.setObjectParent` встановлюються батькі-

вські відносини між метою та кінцевою точкою робочого органу, а функцією `sim.setObjectPosition` задаються координати мети щодо нього.

```

5      setFkMode=function()
6          sim.setExplicitHandling(ikGroup,1)
7          sim.switchThread()
8          sim.setObjectParent(ikTarget,ikTip,true)
9          sim.setObjectPosition(ikTarget,ikTip,{0,0,0})
10         sim.setObjectPosition(ikTarget,ikTip,{0,0,0})
11     end

```

Рисунок 3.7 – Фрагмент коду, функція `setFkMode`

У рядках 12-23 (рисунок 3.8) задається функція, яка встановлює рух кінематичних пар. Тут задаються поточні та максимальні швидкість та прискорення (`currentVel`, `currentAccel`, `maxVel`, `maxAccel`), швидкість кінематичних пар при досягненні мети (`targetVel`). Окрім цього, функція `sim.rmlMoveToJointPositions` дозволяє привести в рух кілька кінематичних пар за рахунок звернення до бібліотеки `Reflexxes Motion Library`. Для цього тут вказані імена КП, які необхідно привести в дію (`jointHandles`), поточні та максимально доступні швидкість та прискорення, нове положення позначених КП (`newPos`) та їх швидкість при досягненні мети (`targetVel`).

```

12     moveToJointPositions=function(newPos,velF)
13         if not velF then velF=1 end
14         local accel=40*math.pi/180
15         local jerk=20*math.pi/180
16         local currentVel={0,0,0,0,0,0}
17         local currentAccel={0,0,0,0,0,0}
18         local maxVel={velF*175*math.pi/180,velF*175*math.pi/180,velF*175*math.pi/180,velF*250*math.pi/180,
19         velF*250*math.pi/180,velF*360*math.pi/180}
20         local maxAccel={accel,accel,accel,accel,accel,accel}
21         local maxJerk={jerk,jerk,jerk,jerk,jerk,jerk}
22         local targetVel={0,0,0,0,0,0}
23         sim.rmlMoveToJointPositions(jointHandles,1,currentVel,currentAccel,maxVel,maxAccel,maxJerk,newPos,targetVel)
24     end

```

Рисунок 3.8 – Фрагмент коду, функція `moveToJointPositions`

У рядках 24-36 так само, як у рядках 12-23 (рисунок 3.9), задаються параметри для допоміжної КП (шарнір), яка до початку симуляції знаходиться в центрі стійки. У міру симуляції цей шарнір переміщається до центру кіл, які описує робочий орган, що буде видно далі, у рядках, наприклад, 53-66 (рисунок 3.10) .

```

24  moveToAuxJointPosition=function(newPos,velF)
25      if not velF then velF=1 end
26      local vel=40*math.pi/180
27      local accel=10*math.pi/180
28      local jerk=30*math.pi/180
29      local currentVel={0}
30      local currentAccel={0}
31      local maxVel={vel*velF}
32      local maxAccel={accel}
33      local maxJerk={jerk}
34      local targetVel={0}
35      sim.rmlMoveToJointPositions({auxJoint}, -1, currentVel, currentAccel, maxVel, maxAccel, maxJerk,{newPos},targetVel)
36  end

```

Рисунок 3.9 – Фрагмент коду, функція moveToAuxJointPosition

У рядках 37-47 ініціалізується функція sysCall_threadmain, яка є головною у дочірніх скриптах. Далі у відповідність використаним у коді змінним ставляться конкретні частини робота.

```

37  function sysCall_threadmain()
38      -- Инициализация
39      jointHandles={}
40      for i=1,6,1 do
41          jointHandles[i]=sim.getObjectHandle('NiryoOne_joint'..i)
42      end
43      model=sim.getObjectAssociatedWithScript(sim.handle_self)
44      ikGroup=sim.getIkGroupHandle('NiryoOne')
45      ikTip=sim.getObjectHandle('NiryoOne_IkTip')
46      ikTarget=sim.getObjectHandle('NiryoOne_IkTarget')
47      auxJoint=sim.getObjectHandle('NiryoOne_auxJoint')

```

Рисунок 3.10 – Фрагмент коду, ініціалізація функції sysCall_threadmain

Далі всередині головної функції в рядках 48-70 (рисунок 3.11) задається головний цикл, що описує траєкторію руху, який, за допомогою параметра `sim.simulation_advancing_abouttostop`, зупиняється незадовго до моменту закінчення симуляції. У ньому тричі повторюється код, який спочатку реалізує розрахунок прямої задачі кінематики (`setFkMode`) і повертає всі ланки на задані кути (`moveToJointPositions`), а потім реалізує розрахунок зворотного завдання кінематики (`setIkMode`), задає координати допоміжного шарніра щодо самого робота. `auxJoint` під час симуляції), встановлює поточні координати допоміжного шарніра нульовими (`sim.setJointPosition`), вказує, що ціль буде рухатися щодо допоміжного шарніра (`sim.setObjectParent`) і задає щодо нього кут повороту мети (`moveToAuxJointPositions`).

```

48      -- Главный цикл:
49      while sim.getSimulationState()~=sim.simulation_advancing_abouttostop do
50          setFkMode()
51          moveToJointPositions({90*math.pi/180,-30*math.pi/180,60*math.pi/180, 0*math.pi/180,60*math.pi/180,0*math.pi/180})
52          setIkMode()
53          sim.setObjectPosition(auxJoint,model,{0,1.5,0})
54          sim.setJointPosition(auxJoint,0)
55          sim.setObjectParent(ikTarget,auxJoint,true)
56          moveToAuxJointPosition(360*math.pi/180)
57          setFkMode()
58          moveToJointPositions({0*math.pi/180,-30*math.pi/180,60*math.pi/180, 0*math.pi/180,60*math.pi/180,0*math.pi/180})
59          setIkMode()
60          sim.setObjectPosition(auxJoint,model,{1.5,0,0})
61          sim.setJointPosition(auxJoint,0)
62          sim.setObjectParent(ikTarget,auxJoint,true)
63          moveToAuxJointPosition(360*math.pi/180)
64          setFkMode()
65          moveToJointPositions({-90*math.pi/180,-30*math.pi/180,60*math.pi/180, 0*math.pi/180,60*math.pi/180,0*math.pi/180})
66          setIkMode() 67 sim.setObjectPosition(auxJoint,model,{0,-1.5,0})
67          sim.setJointPosition(auxJoint,0)
68          sim.setObjectParent(ikTarget,auxJoint,true)
69          moveToAuxJointPosition(360*math.pi/180)
70          setFkMode()
71          moveToJointPositions({0*math.pi/180,0*math.pi/180,0*math.pi/180,0* math.pi / 180 ,0*math.pi/180,0*math.pi/180})
72      end
73  end

```

Рисунок 3.11 – Фрагмент коду, основний цикл функції `sysCall_threadmain`

Якщо відключити розрахунок зворотної кінематики (Calculation module properties → Kinematics, зняти галочку на IK groups enabled), то мета (`IkTarget`) буде описувати кола навколо допоміжного шарніра самостійно. Це пов'язано з

тим, що в перших рядках скрипта, під час опису зворотної кінематики, вказується саме `ikGroup`, а не окремо кожен об'єкт, що входить до неї.

Демонстрація роботи програми зображена на рисунках 3.12 та 3.13.

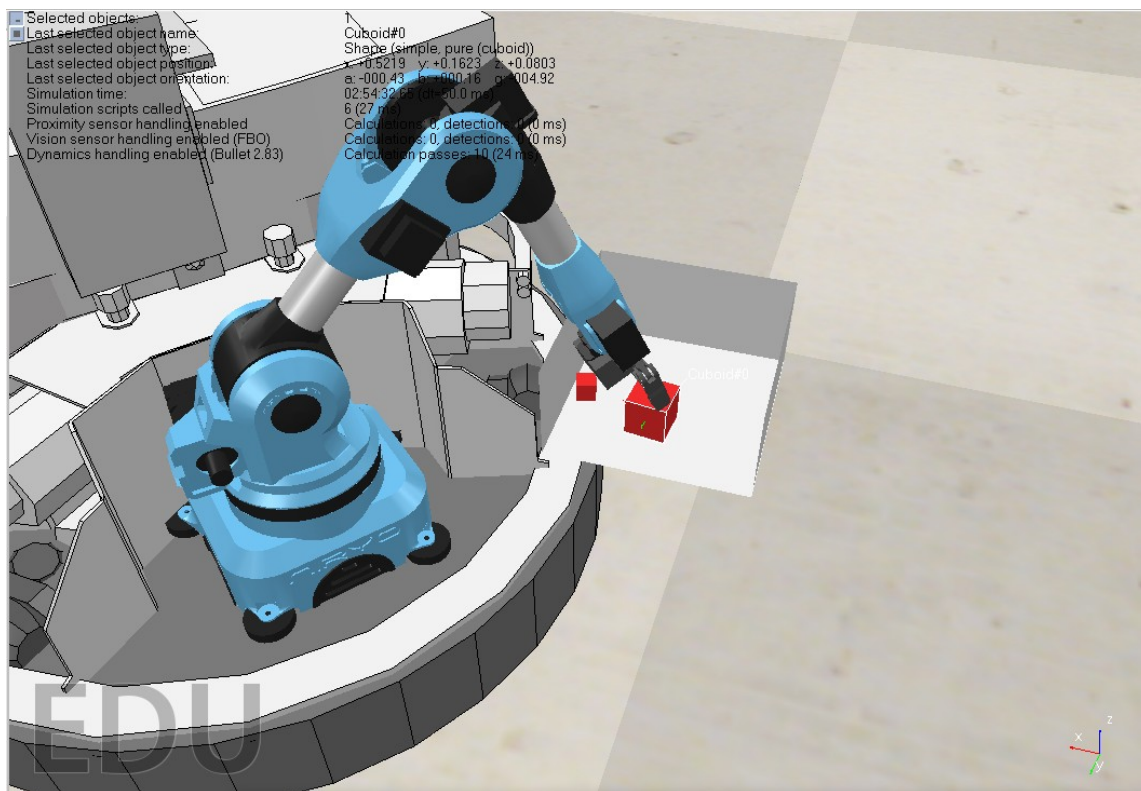


Рисунок 3.12 – Демонстрація роботи програми для маніпулятора

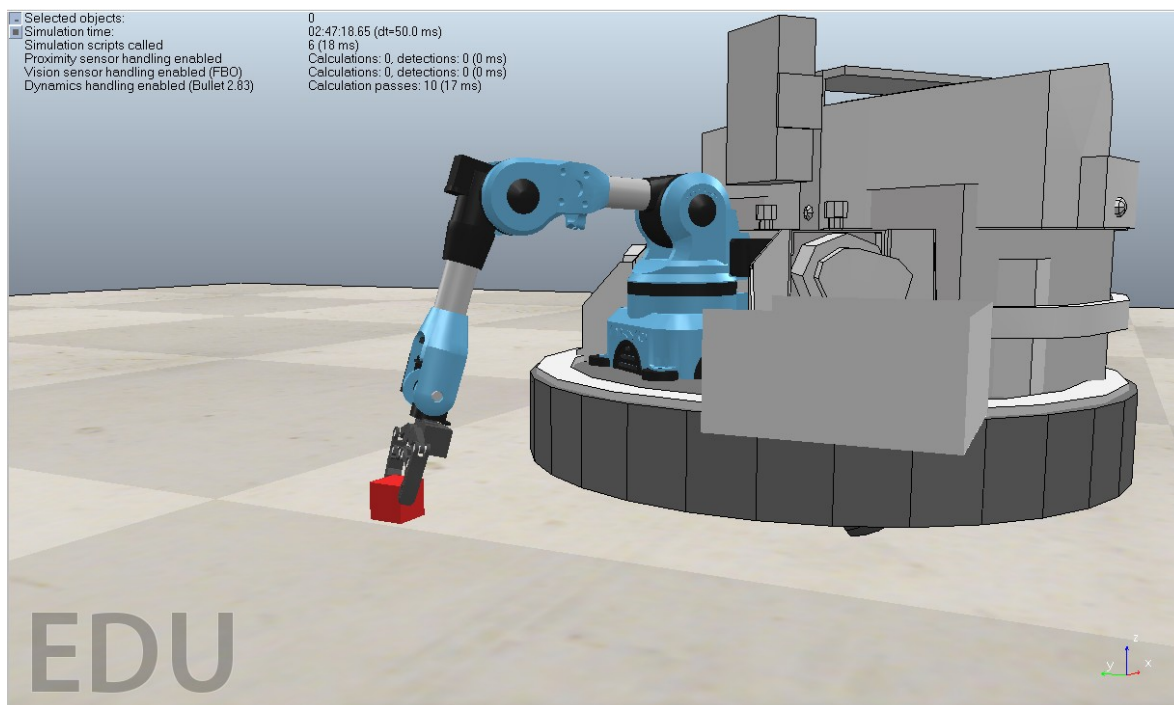


Рисунок 3.13 – Демонстрація роботи програми для маніпулятора (інший ракурс)

У сценарії до сцени використовувалися різні вбудовані функції, опис переміщень робота і, звичайно ж, рішення оберненої задачі кінематики, яке присутнє у завданні функцій у коді, описаному в додатку А, у рядках 4-5, 9-10, 19-20, 24-25, 81-82. Без останнього не вдалося б створити навіть таку просту сцену. З цього можна дійти невтішного висновку, що рішення зворотної завдання кінематики дає певні переваги, оскільки з допомогою неї можна здійснювати операції будь-якої складності для різних виробництв. Від цього вона і набула більшого поширення в порівнянні з прямим завданням кінематики.

3.3 Безпека життєдіяльності та охорона праці

Приміщення із робочими місцями користувачів комп'ютерів для забезпечення електробезпеки обладнання, а також для захисту від ураження

електричним струмом самих користувачів ПК повинні мати достатні технічні засоби.

З метою запобігання ушкодженням, що можуть статися через ураження електричним струмом, загоряння, коротке замикання тощо, розроблено загальний стандарт безпеки ІЕС 950. Загальним стандартом електробезпечності для країн Європейської співдружності є Cemark.

Сучасний рівень технічного прогресу неможливий без широкого впровадження електроустаткування, що у свою чергу викликає необхідність постійного вдосконалювання вимог до його безпечного обслуговування й засобів захисту .

Робота в області електробезпеки повинна ґрунтуватися на продуманій, чіткій, конкретній системі заходів, що забезпечує повне й точне виконання «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів» і «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів». Особливу увагу керівники електрогосподарства повинні приділяти найсуворішому виконанню вимог зазначених Правил щодо утримування й експлуатації електричних мереж і станцій, включаючи розподільні пристрої, де за даними статистики найчастіше відбуваються нещасні випадки. Велика кількість нещасних випадків буває при обслуговуванні й ремонтах електроприводів, пускорегулюючої апаратури, електричного освітлення, зварювальних апаратів, електрифікованого транспорту, електроустаткування, піднімально-транспортних механізмів, ручного переносного електрифікованого інструменту, а також високочастотних установок .

Більша частина нещасних випадків відбувається через низький рівень організації робіт, грубих порушень Правил, у тому числі:

- безпосереднього дотику до відкритих струмоведучих частин і проводам.
- дотику до струмоведучих частин, ізоляція яких ушкоджена;
- дотику до металевих частин устаткування, що випадково під напругою;

- торкання до струмоведучих частин за допомогою предметів з низьким опором ізоляції;
- відсутності або порушення захисного заземлення;
- помилкової подачі напруги під час ремонтів або оглядів;
- впливу електричного струму через дугу;
- впливу крокової напруги й ін.

При ураженні електрострумом треба швидко вимкнути рубильник, обережно звільнити потерпілого від проводів, щоб не поширити дію струму на осіб, які беруть участь у наданні допомоги (звільнити потерпілого в гумових рукавицях або обгорнути руку сухою тканиною, стати на суху дошку чи килимок тощо).

Як встановлено численними дослідженнями, небезпека електричного струму полягає в тому, що внаслідок проходження через тіло людини фібриляційного струму, зумовленого прикладанням різниць потенціалів, відбувається судорожне скорочення м'язів, у тому числі м'язів, що здійснюють дихальний рух грудної клітки, забезпечують роботу серця.

Фібриляційним струмом, що безумовно, призводить до смертельного ураження людини, вважається струм силою 0,1 А. Сила струму визначається не тільки значенням напруги, а й опором тіла людини в момент доторкання до струмоведучої частини.

Ні в якому разі не можна натискувати нижче від краю грудини на м'які тканини, цим можна пошкодити розміщені в черевній порожнині органи. Слід також уникати натискання на кінці ребер, бо це може призвести до перелому.

В оживленні беруть участь дві особи, у крайньому разі допомогу може надати й одна людина, яка по черзі проводить штучне дихання й масаж серця.

У разі ураження електричним струмом треба негайно подати потерпілому першу допомогу, бо це може закінчитись трагічно для нього. Негайно повідомити про нещасний випадок учителя або майстра, які знаходяться поблизу.

Потерпілого насамперед слід відірвати від електричних проводів. При цьому треба бути дуже обережним, бо від доторкання до потерпілого без додержання застережних заходів можна самому опинитися під дією струму.

Для відокремлення людини від електричних проводів, які перебувають під напругою, необхідно вжити таких заходів:

вимкнути струм рубильником або викрутити запобіжну пробку, чи перерубати струможивильні проводи, при цьому кожний провід треба розрізувати окремо. Інструмент, яким розрізуєш або розрубуюєш проводи, повинен бути з ручкою з ізоляційного матеріалу (сухого дерева, пластмаси, гуми та ін.);

відірвати потерпілого від проводу, схопивши його за одяг. Перш ніж торкнутися до потерпілого, слід ізолювати себе від нього, надівши гумові рукавиці, калоші або стати на гумовий килимок, лист фанери або на сухі дерев'яні дошки. Ні в якому разі не можна ставати на вогку землю;

якщо неможливо ізолювати себе від потерпілого, то слід відірвати його від проводу за допомогою дерев'яної дошки або палиці, діючи ними як важелями, якщо можливо, то слід вибити провід з рук потерпілого;

можна також замкнути на коротко проводи, внаслідок чого перегорять запобіжники і в мережі зникне струм. Замикання також відбудеться, якщо накинути на голі проводи дріт або вогку ганчірку.

Останні способи можна застосовувати лише тоді, коли немає змоги вимкнути рубильник або викрутити запобіжну пробку.

Звільнивши потерпілого від проводів, треба забезпечити йому доступ свіжого повітря, відчинити вікна й двері, якщо він перебуває в приміщенні, почати робити йому штучне дихання. Для цього слід:

покласти потерпілого на спину, голову відхилити трохи назад, розстебнути комір, зняти пасок, одяг, що заважає рухам, а також взуття;

для кращого проходження повітря до легенів потерпілого бинтом або носовою хусточкою слід притиснути йому язик до нижньої щелепи, вставивши

між зуби дерев'яну паличку, або тримати язик у витягнутому положенні пальцями, обгорнутими хустинкою;

потім, стоячи позаду голови потерпілого, взяти його за зігнуті руки нижче ліктя й відвести їх від грудної клітки у сторони вгору так, щоб плечові частини рук лягли поряд з головою (вдих), тримаючи в такому положенні близько трьох секунд, відвести руки вниз, обережно притискаючи їх до грудної клітки (лічачи чотири, п'ять, шість).

Надаючи першу медичну допомогу при ураженні електрострумом. слід звернути увагу на дихання, серцево-судинну систему потерпілого.

У разі припинення дихання, серцевої діяльності слід негайно розпочати непрямий масаж серця (натискувати долонями частими поштовхами в ділянці середини грудної кістки, трохи лівіше з ритмом 40-60 поштовхів за хвилину), штучне дихання рот у рот (попередньо закрити потерпілому ніс, вдихнувши повними грудьми, видихнути крізь марлю або носовичок у рот, крізь марлю або носовичок аналогічно робити видих у ніс). Штучне дихання роблять з частотою 16-18 раз на хвилину. Одночасно викликають спеціалізовану бригаду швидкої допомоги. Непрямий масаж серця, штучне дихання роблять до повного відновлення або до надання спеціалізованої допомоги.

При ослабленні серцевої діяльності дихання необхідно забезпечити потерпілому доступ свіжого повітря, дати понюхати нашатирного спирту, влити в рот чайну ложку чи 25 крапель кордіаміну, поплескати по щоках.

При пошкодженні шкіри – накласти стерильну пов'язку, направити потерпілого до лікаря.

Пошкоджену поверхню шкіри навколо опіку треба обробити зеленкою чи рожевим розчином марганцівки, повинна бути аптечка першої лікарської допомоги.

Штучне дихання треба робити безперервно до прибуття лікаря або до відновлення у потерпілого нормального дихання. Далі потерпілого треба відправити на медпункт.

Слід пам'ятати, що штучне дихання треба застосовувати не лише тоді, коли потерпілий виявляє ознаки життя, а й тоді, коли він не виявляє їх зовсім. Треба пам'ятати, що уявна смерть при ураженні електричним струмом у більшості випадків є лише глибокою непритомністю.

Перша допомога буде справді корисною для потерпілого при виконанні таких правил:

- подавати допомогу тільки в нещасних випадках при хворобливому стані, що загрожує життю, а не займатися лікуванням хворого;
- з'ясовуючи характер ушкоджень, не доторкатися до ушкоджених частин тіла, не обмацувати їх, а обмежитись лише розпитуванням, оглядом;
- якщо неможливо визначити характер ушкодження, слід вважати його найтяжчим;
- піклуватися не тільки про те, щоб допомогти потерпілому, а й про те, щоб не пошкодити йому: вибирати заходи допомоги безболісні, безпечні;
- вживати тільки найнеобхідніших заходів;
- твердо пам'ятати, що перша допомога не може замінити допомогу лікаря.

Пожежа – неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, що розповсюджується у часі і просторі.

Залежно від розмірів матеріальних збитків пожежі поділяються на особливо великі (коли збитки становлять від 10000 і більше розмірів мінімальної заробітної плати) і великі (збитки сягають від 1000 до 10 000 розмірів мінімальної заробітної плати) та інші. Проте наслідки пожеж не обмежуються суто матеріальними втратами, пов'язаними зі знищенням або пошкодженням основних виробничих та невиробничих фондів, товарно-матеріальних цінностей, особистого майна населення, витратами на ліквідацію пожежі та її наслідків, на компенсацію постраждалим .

Найвідчутнішими, безперечно, є соціальні наслідки, які, передусім, пов'язуються з загибеллю і травмуванням людей, а також порушенням їх

фізичного та психологічного стану, зростанням захворюваності населення, підвищенням соціальної напруги у суспільстві внаслідок втрати житлового фонду, позбавленням робочих місць тощо.

Не слід забувати й про екологічні наслідки пожеж, до яких, у першу чергу, можна віднести забруднення навколишнього середовища продуктами горіння, засобами пожежогасіння та пошкодженими матеріалами, руйнування озонового шару, втрати атмосферою кисню, теплове забруднення, посилення парникового ефекту тощо.

Цілком закономірно, що існує безпосередня зацікавленість у зниженні вірогідності виникнення пожеж і зменшенні шкоди від них. Досягнення цієї мети є досить актуальним і складним соціально-економічним завданням, вирішенню якого повинні сприяти системи пожежної безпеки.

Пожежна безпека об'єкта – стан об'єкта, за якого з регламентованою імовірністю виключається можливість виникнення і розвитку пожежі та впливу на людей її небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

Основними напрямками забезпечення пожежної безпеки є усунення умов виникнення пожежі та мінімізація її наслідків.

Об'єкти повинні мати системи пожежної безпеки, спрямовані на запобігання пожежі, дії на людей та матеріальні цінності небезпечних факторів пожежі, в тому числі їх вторинних проявів. До таких факторів належать: полум'я та іскри, підвищена температура навколишнього середовища, токсичні продукти горіння й термічного розкладу матеріалів і речовин, дим, знижена концентрація кисню.

Вторинними проявами небезпечних факторів пожежі вважаються: уламки, частини зруйнованих апаратів, агрегатів, установок, конструкцій; радіоактивні та токсичні речовини і матеріали, викинуті зі зруйнованих апаратів та установок; електричний струм, пов'язаний з переходом напруги на струмопровідні елементи будівельних конструкцій, апаратів, агрегатів

внаслідок пошкодження ізоляції під дією високих температур; небезпечні фактори вибухів, пов'язаних з пожежами; вогнегасні речовини.

Системи пожежної безпеки – це комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на запобігання пожежі та збитків від неї.

Пожежна безпека об'єкта повинна забезпечуватися системою запобігання пожежі, системою протипожежного захисту і системою організаційно-технічних заходів.

Системи пожежної безпеки мають запобігти виникненню пожежі і впливу на людей небезпечних факторів пожежі на необхідному рівні. Об'єкти, пожежі на яких можуть призвести до загибелі або масового ураження людей небезпечними факторами пожежі та їх вторинними проявами, а також до значного пошкодження матеріальних цінностей, повинні мати системи пожежної безпеки, що забезпечують мінімально можливу імовірність виникнення пожежі.

Метою пожежної безпеки об'єкта є попередження виникнення пожежі на визначеному чинними нормативами рівні, а у випадку виникнення пожежі – обмеження її розповсюдження, своєчасне виявлення, гасіння пожежі, захист людей і матеріальних цінностей.

Основними вихідними даними при розробці комплексу технічних і організаційних рішень щодо забезпечення потрібного рівня пожежної безпеки в кожному конкретному випадку є чинна законодавча і нормативно-технічна база з питань пожежної безпеки, вибухопожежонебезпечні властивості матеріалів і речовин, що застосовуються у виробничому циклі, кількість вибухопожежонебезпечних матеріалів і речовин і особливості виробництва. На основі цих вихідних даних визначаються такі критерії вибухопожежонебезпеки об'єкта, як категорії приміщень і будівель за вибуховою і пожежною небезпекою, а також класи вибухонебезпечних і пожежонебезпечних зон. Саме залежно від категорії приміщень та будівель і класу зон за вибуховою і пожежною небезпекою, відповідно до вимог чинних нормативів,

розробляються технічні і організаційні заходи і засоби забезпечення вибухопожежної безпеки .

3.4 Висновки до розділу

Було розроблено ряд алгоритмів програмування для керування маніпулятором для цього було вирішене зворотне завдання кінематики в середі CoppeliaSim.

У ході роботи розглянув алгебраїчний та геометричний підходи до вирішення кінематичної задачі, провів структурний аналіз маніпулятора, побудував структурну схему. Та за допомогою інструментів вирішення зворотної задачі кінематики робототехнічного симулятора CoppeliaSim, розробив програму для керування маніпулятором.

ВИСНОВКИ

Метою кваліфікаційної роботи була розробка технічних засобів та моделювання маніпуляційної системи мобільного робота, що реалізована створенням моделі логістичного робота для доставки вантажів.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було розроблено технічне та програмне забезпечення, за допомогою якого виконується рух маніпулятора транспортного робота Festo Robotino. В процесі розробки була вирішена зворотна задача кінематики маніпулятора. Було проведено тестування програмного забезпечення за допомогою симулятора V-REP.

Розробка відбувалась у середовищі V-REP для створення комп'ютерної моделі маніпуляторного мобільного робота на базі Festo Robotino.

Розвиток даного проєкту в майбутньому має великий потенціал для модернізації та допрацювання. Створена система дозволить тестувати подальші розробки, не докладаючи великих зусиль для перенесення моделі у реальний світ. Засоби моделювання дозволяють легко додавати або змінювати функціонал системи для тестування конкретних елементів моделі або всієї моделі в цілому.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. [Чинний від 2015–06–22]. Вид. офіц. Київ, 2017. 29 с. (Інформація та документація).

2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: / упоряд. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. Київ, 2018. 320 с.

3. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків : ХНУРЕ, 2021. 50 с.

4. Імшенецький Я. О. Розроблення технічних засобів маніпуляційної системи мобільного робота Festo Robotino / Я. О. Імшенецький, О. М. Цимбал // *Сучасні аспекти та перспективні напрямки розвитку науки*: матеріали II Міжнародної студентської наукової конференції. Мукачево, Том 3, 2021. С. 41–44.

5. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин [Текст] / Артоболевский, И.И. – М: ИД Альянс, 2011 – 640 с.

6. Бекишев, Р.Ф. Общий курс электропривода [Текст] / Бекишев Р.Ф., Дементьев Ю.Н., – Томск: ТПУ, 2010. – 302 с.

7. Белянин, П.Н. Промышленные роботы и их применение [Текст] / Белянин П.Н. -М.: машиностроение, 2012. – 74 с.

8. Герман-Галкин, С.Г. Проектирование мехатронных систем [Текст] / С.Г. Герман-Галкин. - СПб.: корона - Век, 2013. – 368 с.

9. Герц, Е.В. Расчёт пневмоприводов [Текст] / Герц Е.В. – М.: машиностроение, 2012. – 72с.
10. Глазков, В. П. Методы решения прямой и обратной задач кинематики роботов-манипуляторов [Текст] / 2005. – с. 10 – 23
11. Егоров, О.Д. Робототехнические мехатронные системы [Текст] / Егоров О.Д., Подураев Ю.В., Бубнов М.А. – М: станкин, 2015. – 326 с.
12. Козырев, Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов [Текст] / Козырев Ю.Г., Учебное пособие – М: КноРус, 2016. - 318 с.
13. Козырев, Ю.Г. Манипулирующее устройство [Текст] / Козырев Ю.Г. - М.: машиностроение, 2012. – 104 с.
14. Москвичев, А.А. Захватные устройства промышленных роботов и манипуляторов [Текст] / Москвичев А.А., Учебное пособие – К: форум, 2017. – 176 с.
15. Robotino – для освіти та досліджень: Преміум та базова версії. 2017. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.festo-didactic.com/int-en/learning-systems/education-and-research-robots-robotino/robotino-for-research-and-education-premium-edition-and-basic-edition.htm> (дата звертання: 23.11.2021)
16. Горбенко М. В. Основы мехатроники и робототехники : учеб. пособие / Горбенко М. В., Горбенко Т. И. – Томск : томский государственный университет, 2012. – 126 с.
17. Крейг Д. Введение в робототехнику. Механика и управление / Д. Крейг. – М. : институт компьютерных исследований, 2013. – 564 с.
18. Борисов О. И. Методы управления робототехническими приложениями : учеб. пособие / Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А. – СПб.: университет ИТМО, 2016. – 108 с.
19. Горбенко Т. И. Практикум по теории механизмов и машин : учебное пособие / Т. И. Горбенко, М. В. Горбенко ; Том. гос. ун-т, Ин-т дистанционного образования. –Томск : ИДО ТГУ, 2010. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000405287> (дата звертання: 23.11.2021)