



Я, Бондаренко Артем Мовсесович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"19" червня 2025 р

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'A' followed by a series of loops and a final flourish.

Артем БОНДАРЕНКО

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_  
(підпис)  
« 28 » квітня 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві \_\_\_\_\_ Бондаренко Артему Мовсесовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення захватного пристрою для маніпулювання небезпечними об'єктами \_\_\_\_\_  
затверджена наказом по університету від 19.05.2025 р. № 390 Ст \_\_\_\_\_
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 23.06.2025 р. \_\_\_\_\_
3. Вихідні дані до роботи Середовище моделювання Autodesk Fusion 360 \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_  
4.1 Аналіз предметної області; 4.2 Аналіз сучасних досліджень; 4.3 Аналіз мехатронної системи маніпулятора; 4.4 Аналіз апаратної бази; 4.5 Програмне забезпечення; 4.6 Опис принципу роботи; 4.7 Розроблення захватного пристрою; 4.8 Забезпечення безпечних умов праці при проєктуванні захватного пристрою \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Графічний матеріал у вигляді презентації (файл \*.ppt), 12 арк. ф. А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

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 предметної області	28.04-04.05.2025	виконано
2	Аналіз сучасних досліджень	05.05-10.05.2025	виконано
3	Аналіз мехатронної системи маніпулятора	11.05-17.05.2025	виконано
4	Розроблення захватного пристрою	18.05-25.05.2025	виконано
5	Проведення досліджень конструкції	26.05-31.05.2025	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	01.06-03.06.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	04.06-17.06.2025	виконано
8	Подання роботи на рецензію	18.06-19.06.2025	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	20.06-14.06.2025	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	23.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 28 квітня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_ Артем БОНДАРЕНКО  
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. Наталія ДЕМСЬКА  
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 59 с., 1 табл., 29 рис., 2 додатків, 23 джерел.

### ЗАХВАТНИЙ ПРИСТРІЙ, НЕБЕЗПЕЧНІ ОБ'ЄКТИ, МЕХАНІКА МАНІПУЛЯТОРІВ, ВИРОБНИЦТВО

Об'єкт розробки – маніпуляції захватного пристрою над небезпечними об'єктами.

Предмет розробки – конструкція та функціонування захватного пристрою.

Методи розробки – аналіз захватних пристроїв та їх проблем, розробка захватного пристрою та створення віртуальної моделі макету.

Мета роботи – підвищити ефективність виконання маніпуляцій з небезпечними об'єктами.

У роботі було проведено аналіз сучасних підходів до розробки захватних пристроїв мобільних роботів, призначених для взаємодії з небезпечними та нестабільними об'єктами.

Було обґрунтовано вибір конструктивної архітектури захвата, що дозволяє забезпечити делікатну та безпечну взаємодію з об'єктами різної форми та фізичних властивостей.

У рамках роботи було створено тривимірну модель прототипу захватного пристрою в середовищі Fusion 360. Запроєктований макет передбачає реалізацію трипальцевої конструкції з трьома фалангами на кожному пальці, що забезпечує високу ступінь гнучкості та адаптації до форми об'єкта.

## ABSTRACT

Explanatory note: 59 p., 1 tables, 29 figures, 2 appendices, 23 sources.

GRIPPING DEVICE, DANGEROUS OBJECTS, MANIPULATOR  
MECHANICS, PRODUCTION

The object of development is manipulation of the gripping device over dangerous objects.

The subject of development is the design and functioning of the gripping device.

Development methods are the analysis of gripping devices and their problems, the development of the gripping device and the creation of a virtual model of the layout.

The purpose of the work is to increase the efficiency of manipulations with dangerous objects.

The work analyzed modern approaches to the development of gripping devices for mobile robots intended for interaction with dangerous and unstable objects. The choice of a constructive gripping architecture was justified, which allows for delicate and safe interaction with objects of various shapes and physical properties. As part of the work, a three-dimensional model of a prototype gripping device was created in the Fusion 360 environment. The designed layout involves the implementation of a three-finger design with three phalanges on each finger, which provides a high degree of flexibility and adaptation to the shape of the object.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень	6
Вступ	7
1 Аналіз технічного завдання та літератури	9
1.1 Аналіз предметної області	9
1.2 Аналіз сучасних досліджень	12
2 Аналіз мехатронної системи маніпулятора	20
2.1 Аналіз апаратної бази	20
2.1.1 Живлення	21
2.1.2 Пульти дистанційного керування	22
2.1.3 Робот	23
2.1.4 Мікроконтролер	23
2.1.5 Серводвигун	24
2.1.6 Кроковий двигун	26
2.1.7 Роботизована рука	28
2.2 Програмне забезпечення	29
2.3 Принцип роботи	30
3 Розроблення захватного пристрою	33
3.1 Обґрунтування ідеї проекту	33
3.2 Створення захватного пристрою	34
3.3 Забезпечення безпечних умов праці при проектуванні захватного пристрою	48
Висновки	51
Перелік джерел посилання	52
Додаток А Конструкторські документи	55
Додаток Б Демонстраційний матеріал	56

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ**

- ЗП – захватний пристрій;  
ІВС – інформаційно-вимірювальна система;  
КС – керуюча система;  
МР – мобільний робот;  
МС – маніпуляційна система;  
НО – небезпечний об’єкт;  
НС – навколишнє середовище;  
ОМ – об’єкт маніпулювання;  
ПІ – пропорційно-інтегральний;  
ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;  
РТС – робототехнічна система;  
САПР – системи автоматизованого проектування;  
СЗ – система зв’язку;  
СП – система пересування;  
ЦСР – цілі сталого розвитку;  
DoF – ступені свободи;  
MPLAB – Microchip Programmable Intelligent Computer Laboratory.

## ВСТУП

У сучасному світі технологій, де автоматизовані системи стрімко еволюціонують, значно зростає потреба у мобільних робототехнічних платформах. Ці платформи мають бути здатними самостійно виконувати завдання в умовах підвищеної небезпеки. Ключовою функцією таких роботів є не лише пересування, а й здатність взаємодіяти з об'єктами – захоплювати, переміщувати або надійно фіксувати їх без участі людини [1]. Це особливо важливо, коли йдеться про небезпечні, легко пошкоджувані або нестійкі об'єкти, які потребують обережного та контрольованого поводження.

З огляду на це, виникає необхідність у створенні інтелектуальних захоплювальних пристроїв, які могли б адаптувати свою роботу до типу об'єкта, його форми, ваги, а також, найголовніше, до рівня потенційної небезпеки. Такий захват має не тільки утримувати предмет, але й робити це з урахуванням необхідної сили та з мінімальним ризиком для навколишнього середовища.

У багатьох галузях промисловості, зокрема, у хімічній, фармацевтичній та електронній сферах, працівники щодня стикаються з об'єктами, що несуть потенційну загрозу здоров'ю або життю. Це можуть бути скляні ємності з агресивними хімікатами, нестійкі пробірки з вибухонебезпечними речовинами, акумулятори з ризиком займання або крихкі компоненти мікроелектроніки, які легко пошкодити. Всі ці об'єкти вимагають максимально точного, передбачуваного та контрольованого поводження [1].

Тому виникає необхідність у використанні адаптивних робототехнічних захватів, що зможуть делікатно взаємодіяти з крихкими об'єктами, і при цьому гарантовано утримувати нестабільні або небезпечні речовини. Автоматизація подібних операцій сприяє мінімізації впливу людського фактора, покращенню ефективності виробничих процесів та суттєвому підвищенню рівня безпеки для працівників. Створення та інтеграція таких систем – це важливий етап у напрямку сучасного інтелектуального виробництва.

Об'єкт розробки – маніпуляції захватного пристрою над небезпечними об'єктами.

Предмет розробки – конструкція та функціонування захватного пристрою.

Методи розробки – аналіз захватних пристроїв та їх проблем, розробка захватного пристрою та створення віртуальної моделі макету.

Мета роботи – підвищити ефективність виконання маніпуляцій з небезпечними об'єктами.

Для досягнення мети даної роботи були відокремлені такі завдання:

- провести аналіз теоретичної бази та мехатронної системи маніпулятора, електроніки;
- розробити модель захватного пристрою у Fusion 360;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [2].

Робота виконано згідно [3-4]. Проведені дослідження відповідають цілям сталого розвитку (ЦСР) 9, так як наукові дослідження та інновації є важливими факторами, що сприяють сталому розвитку.

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ЛІТЕРАТУРИ

## 1.1 Аналіз предметної області

Наявність небезпеки для здоров'я людини в техногенних або воєнних умовах потребує використання роботів і маніпуляторів, з кастомними маніпуляторами, призначеними для певного застосування (наприклад, зняття з експлуатації атомних електростанцій або для розмінування) [4]. В процесі роботи з небезпечними об'єктами (НО) основна роль відведена кінцевому ефектору (захватному пристрою). Захоплювальний механізм виконує роль не тільки частини маніпулятора, але й ключового складника, який визначає ефективність та безпеку цілісного роботизованого комплексу [5]. Сучасні тенденції вимагають від подібних систем високої точності, гнучкості, здатності відчувати об'єкт, а також можливості безпечної роботи з об'єктами, котрі можуть бути нестабільними, крихкими чи небезпечними для людини.

Механізми захватних пристроїв (ЗП) відносяться до одних із основних елементів мобільних роботів (МР), які визначають їх технологічні можливості. Такі вимоги до ЗП, як маневреність, універсальність, швидкозмінність, швидкодія, переналагоджуваність та обмежена маса значною мірою є загальними та висуваються до промислових роботів загалом.

При конструюванні ЗП МР враховують властивості і форму захоплюваних об'єктів, що визначає спосіб утримання об'єкта і особливості технологічного процесу, що проявляються в специфіці застосовуваної оснастки [4].

Робота з небезпечним об'єктом є необхідною для проведення підготовчих операцій по транспортуванню об'єктів, визначенню їх стану та ступеня небезпечності або для знешкодження об'єктів на місці. Тому при проєктування робототехнічної системи (РТС) слід враховувати природу дії небезпечних об'єктів [5].

Небезпечні об'єкти мають різну природу дії: нажимної, розвантажувальної,

вібраційної, нахильної, розтяжної, обривної, годинникової, ємнісної, індукційної, оптичної, сейсмічної, акустичної та ін. [6]

Серед перелічених принципів дії НО можна виділити два, при роботі з якими використовуються ЗП, без використання додаткового обладнання та використання специфічних матеріалів та заходів: нахильної та нажимної дії.

Для НО нахильної дії, у разі нахилу (зміни центру маси об'єкту) металева кулька замикає контакти ланцюга, що призводить до підриву НО [6] (рис. 1.1, а).

НО нажимної дії, побудований на принципі замикання контактних пластин, при розвантаженні однієї з направляючих поверхонь рами, що призводить до замикання контактів під механічною дією пружини (фрагменту зігнутої гуми) що призводить до руйнування НО [6] (рис. 1.1, б).

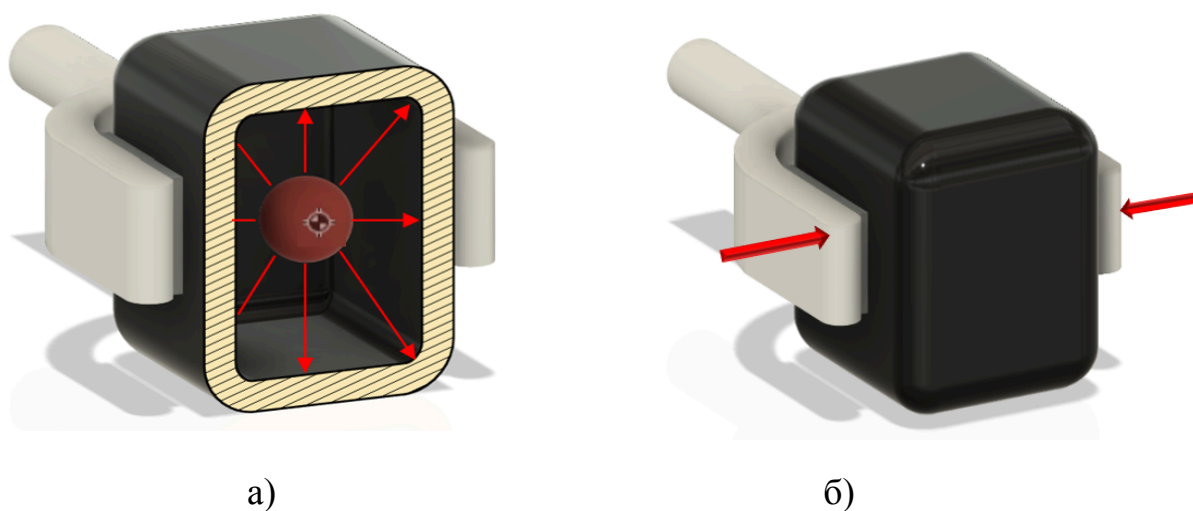


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення принципів дії НО

В першому випадку (рис. 1.1, а) необхідно забезпечити стійкість не лише маніпулятора, а й всієї платформи в цілому. Тут вже проектувати РТС необхідно враховуючи структуру робота, який взаємодіє з навколишнім середовищем (НС) чи об'єктом маніпулювання (ОМ) (рис. 1.2).

У загальному випадку робот складається систем: система пересування (СП); виконавча маніпуляційна система (МС); сенсорна інформаційно-вимірювальна система (ІВС); керуюча система (КС); система зв'язку (СЗ) [7].



Рисунок 1.2 – Узагальнена структура робота, взаємодіючого з навколишнім середовищем [7]

РТС оснащений маніпулятором призначений для роботи з небезпечними об'єктами повинен бути автономною самохідною, модульною машиною із високою стійкістю до дії зовнішніх факторів. Найпоширенішими і надійнішими для даних операцій вважаються платформи на колісній та гусеничній системі пересування (рис. 1.3).

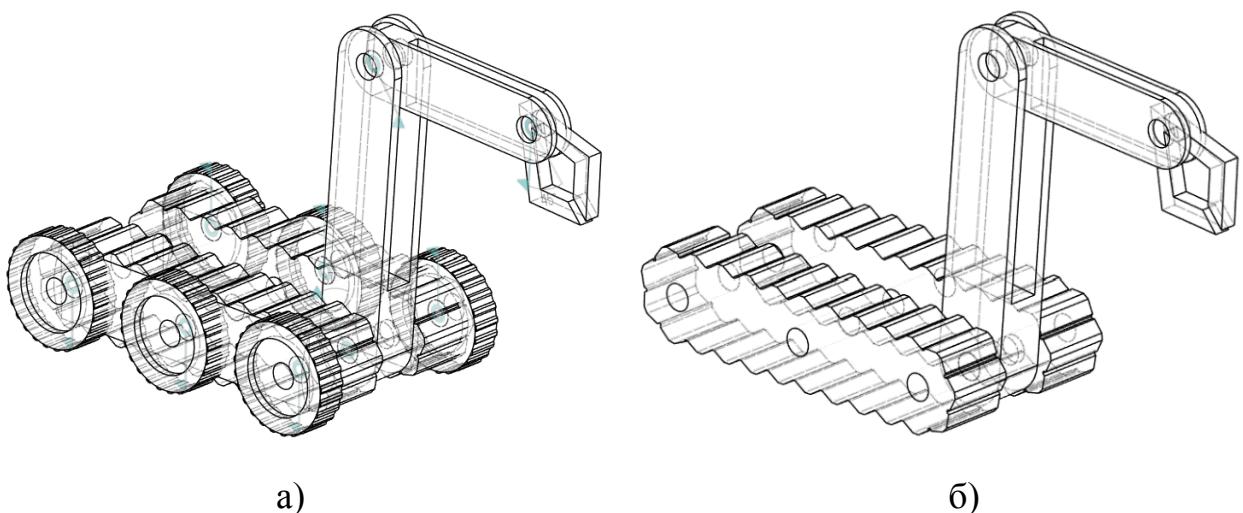


Рисунок 1.3 – Системи пересування робота

Колісні роботи (рис. 1.3, а) мають високу швидкість руху та хорошу

стійкість на рівній місцевості, але їм важко долати перешкоди на пересіченій місцевості. Гусеничні (рис. 1.3, б) роботи мають кращу здатність долати перешкоди та адаптуватися до нерівної місцевості, але мають недоліки у вигляді високого енергоспоживання [5].

Для випадку роботи з НО необхідно враховувати динамічну поведінку всіх елементів робота-маніпулятора (тобто виконавчих механізмів, датчиків та структурної податливості ланок) на додаток до динаміки твердого тіла. Для стійкості робота повинна бути певна початкова податливість або в самому роботі, або в середовищі. Згідно з цією умовою стійкості, менша чутливість або в роботі, або в середовищі призводить до вузького діапазону стійкості. У межі, коли і робот, і середовище мають нульову чутливість, стійкість не може бути гарантована [5].

## 1.2 Аналіз сучасних досліджень

Розвиток основних положень теорії проектування РТС потребує розроблення схемних і конструктивних рішень маніпуляторів. Наявність НО потребує вибору спеціальних матеріалів та відповідних технологій виготовлення окремих вузлів і деталей маніпулятора. Специфіка застосування МР та особливості їх масо-габаритних параметрів потребує спеціальних підходів і методів підвищення точності позиціонування маніпуляторів [5].

Ці питання є актуальними для розвитку теорії проектування маніпуляторів наземних роботизованих комплексів. Вибір геометричних параметрів маніпуляторів здійснено на основі аналізу наявних конструкцій наземних роботизованих комплексів та результатів проведених досліджень [5]. Типова конструкція маніпулятора встановленого на шасі МР реалізована за схемою маніпулятора важільного типу (рис. 1.4).

Робочий орган маніпулятора має пристрій захвату предметів. Пристрій для знаходження вибухонебезпечних предметів має чутливий елемент, спеціальну раму та гідравлічний привід. Положення центра мас залежить від конфігурації

маніпулятора та довжини його важелів. Збільшення довжини важелів приводить до значного збільшення висоти центра мас і відповідно погіршення параметрів статичної стійкості маніпулятора при його роботі із масивними небезпечними об'єктами.

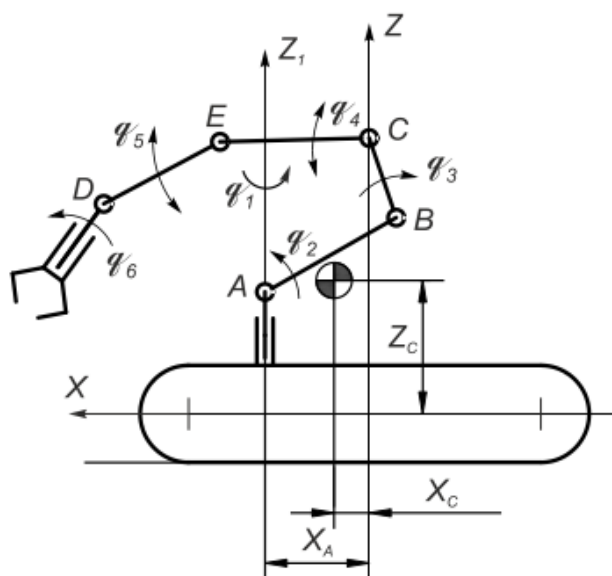


Рисунок 1.4 – Типова схемна реалізація наземного роботизованого комплексу із маніпулятором важільного типу [6]

Конструкція маніпулятора такого типу може бути реалізована із немагнітних (композитних) матеріалів, що є важливим при роботі з небезпечними об'єктами. Перевагою даної конструкції є гнучкість процесу регулювання положення виконавчого органу маніпулятора. Недоліком конструкції є обмежений робочий простір маніпулятора. Для усунення даного недоліку запропоновані гібридні рішення маніпуляторів [4, 5]. Вони включають маніпулятори важільного типу об'єднані із маніпуляторами на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами.

Небезпечні об'єкти як правило потребують особливих вимог до конструктивно-технологічного рішення маніпулятора наземного роботизованого комплексу. Основною вимогою є застосування немагнітних або неметалевих матеріалів у конструкції маніпулятора та його виконавчого органу.

Відповідно до цього, спостерігається збільшення потреби у дослідженні та проектуванні захватних пристроїв, здатних гарантувати як надійне утримання об'єкта, так і контрольований вплив на нього без ризику пошкоджень. Особливу вагу мають розробки, що об'єднують механічну гнучкість, сенсорний зворотний зв'язок та програмну адаптацію захвату в реальному часі.

У сучасних наукових підходах, зокрема у дослідженні [8], розглядається застосування пальців, наповнених в'язкопружною рідиною, які здатні змінювати свою форму відповідно до геометрії об'єкта. Це дозволяє досягати рівномірного розподілу тиску по контактній поверхні, забезпечуючи м'яке і точне захоплення. Така технологія є особливо ефективною при роботі з деформованими або крихкими матеріалами, де навіть незначне перевищення сили може призвести до пошкодження. Суттєвою перевагою є також можливість прогнозування так званої «небезпечної зони» – межі, за якою об'єкт втрачає структурну цілісність. Це досягається за рахунок аналізу фазових характеристик тиску в процесі маніпулювання.

Інший перспективний варіант реалізації демонструється в системі захватного пристрою з трьома пальцями, спроектованої для умов мікрогравітації [9]. У цьому рішенні ключовий акцент зроблено на гнучку кінематику та автономність руху кожного пальця, що дозволяє ефективно маніпулювати об'єктами складної форми, навіть якщо вони зміщені відносно центральної осі робочої області. Конструкція поєднує високоточне позиціонування, оптимальне розподілення сил і розвинену сенсорну систему, яка базується на використанні оптичних датчиків наближення та сенсорів Холла для вимірювання сили, положення і відстані до об'єкта [10].

Окрім суто механічної складової, сучасні захватні пристрої дедалі частіше поєднують у своїй структурі сенсорні елементи – зокрема датчики сили, тиску, температури та інших параметрів взаємодії. Разом з тим, у такі системи інтегруються й модулі штучного інтелекту, які дозволяють не лише реагувати, а й прогнозувати можливі наслідки дотику або захоплення об'єкта. У її межах поєднуються еластичні, біоінспіровані конструкції з інтелектуальними засобами

керування. Дослідження, зосереджені на пристроях зі змінною жорсткістю, пневматичних чи гідравлічних приводах, демонструють високу перспективність їх застосування у сферах, де звичайні маніпулятори виявляються неефективними [11].

Такий підхід відкриває можливість до реалізації принципів м'якої робототехніки (рис. 1.5) – напряду, що активно розвивається останні десятиліття, особливо у сферах біомедичних, сервісних і рятувальних робототехнічних систем.

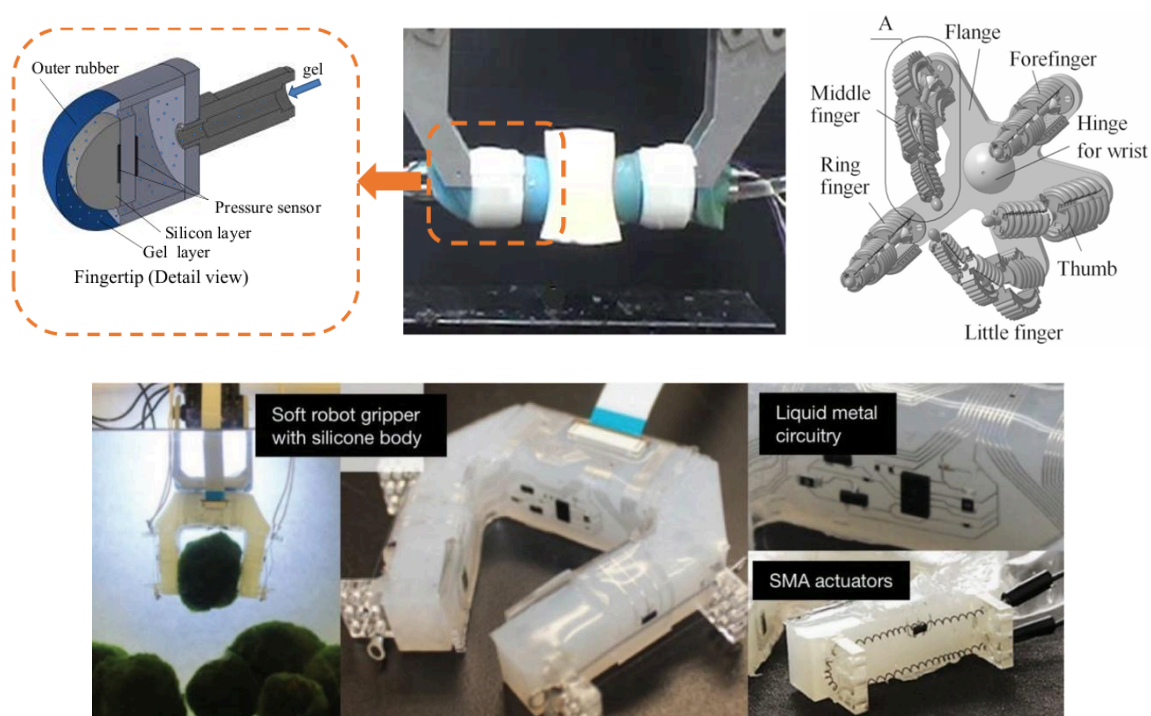


Рисунок 1.5 – Варіанти реалізації принципів м'якої робототехніки [8, 12, 13]

Значущим прикладом прикладного дослідження у сфері м'яких захватних пристроїв є матеріал, представлений у роботі [12], де розглядається специфіка взаємодії м'яких пальців із делікатними об'єктами, зокрема такими як тофу. Центральною ідеєю цієї роботи виступає поняття «небезпечної зони» – умовного порогу, після якого подальше зростання зусилля призводить до руйнування структури об'єкта. Саме ідентифікація цього моменту дозволяє побудувати ефективну систему контролю сили захоплення, яка здатна

адаптувати параметри взаємодії в реальному часі та забезпечити мінімальний рівень впливу на об'єкт.

Сучасна тенденція в таких розробках зміщується від стандартних жорстких систем до адаптивних, динамічних конструкцій, здатних не просто реагувати на зміну умов, а передбачати їх. У центрі уваги – не універсальність, а контекстна гнучкість, яка досягається завдяки сенсорного зворотного зв'язку та алгоритмів, побудованих на базі машинного навчання. Подібні системи не лише забезпечують високоточну взаємодію з об'єктом, а й мінімізують ризики для середовища, оператора та самого робота, що є особливо актуальним у випадку з маніпулюванням потенційно небезпечними матеріалами.

При цьому вибір конкретної конструкції захватного механізму, як і раніше, визначається поставленим завданням. Якщо об'єкт стабільним – доцільним буде жорсткий захват. Якщо ж ідеться про крихкі, нестабільні або делікатні предмети – ефективнішим є м'який, гнучкий підхід. У випадку ж роботи з потенційно небезпечними об'єктами, що можуть бути чутливими як до сили натискання, так і до зміщення центру маси чи вібрацій, доцільним є поєднання обох концепцій. Контрольована жорсткість і обережне, м'яке торкання – саме така комбінація формує основний інженерний виклик і водночас ціль дослідження в рамках цієї розробки [13].

Окремий інтерес у цьому контексті викликають адаптивні системи із змінною жорсткістю. Подібні захвати можуть змінювати свої механічні властивості в режимі реального часу – наприклад, перетворюватись із жорсткої конфігурації у м'яку або навпаки, залежно від типу об'єкта та ситуації. Такі ефекти досягаються за рахунок еластичних матеріалів, спеціальних рідин або керованого пневматичного тиску. Це дозволяє забезпечити точну взаємодію навіть з об'єктами, які мають складну геометрію або нестабільні характеристики.

Подальший розвиток таких систем передбачає глибоку інтеграцію з елементами штучного інтелекту, що дозволить реалізовувати повноцінну самостійну поведінку захвата в умовах змінного, непередбачуваного

середовища.

У сфері мобільної робототехніки, особливо в контексті взаємодії з потенційно небезпечними об'єктами, пріоритетною є тенденція до використання м'яких або гібридних захватних систем. Подібні рішення дозволяють знизити рівень механічного впливу на об'єкт, що особливо важливо при роботі з тендітними, нестабільними або вибухонебезпечними матеріалами. Як зазначено у роботі [14], сучасні конструкції часто поєднують у собі еластичні елементи, що забезпечують плавність захоплення, і жорсткі компоненти, які стабілізують утримання.

Одним із прикладів такого підходу є робот OBRERO (рис. 1.6) [15], в якій реалізовано принцип тактильного зворотного зв'язку. Завдяки цьому захватний пристрій не лише виконує захоплення об'єкта, але й реагує на зміну сили контакту, фактично «відчуваючи» взаємодію. Таке рішення дозволяє контролювати натиск, запобігаючи як механічному пошкодженню, так і зміщенню центру маси небезпечного об'єкта, що критично для збереження стабільності під час транспортування або маніпулювання.



Рисунок 1.6 – Система OBRERO, в якій реалізовано принцип тактильного зворотного зв'язку [15]

Система OBRERO [15] має високочутливу руку з керованим зусиллям, важіль з керованим зусиллям та відеокамеру як голову. Рука має три пальці, 8 ступенів свободи, 5 двигунів, 8 датчиків сили, 10 датчиків положення та 160

тактильних датчиків. Їхнє завдання – не просто зафіксувати сам факт дотику, а зчитати характер розподілу тиску, площу контакту та зміну навантаження під час маніпуляції. Це дозволяє системі виявити ковзання, нерівності, нестійке положення або надмірне точкове навантаження і відповідно до цього відкоригувати силу захоплення.

Крім того, сама конструкція модуля має залишатися гнучкою, з достатнім запасом деформації. Це потрібно для зниження ударних навантажень при початковому контакті або зовнішніх збуреннях, які можуть виникати через рух мобільної платформи, вібрацію двигуна або нестійкість самого об'єкта. Якщо предмет хитається, котиться або плаває у рідині – захват має не зупинятись, а навпаки – м'яко, поступово стабілізувати об'єкт за допомогою контрольованого нарощування сили [16].

Класифікація захватних механізмів передбачає поділ за кількома критеріями: кількість ступенів свободи, число маніпуляційних елементів (наприклад, двопальцеві, трипальцеві або антропоморфні конструкції з п'ятьма пальцями), тип приводу (електричний, пневматичний або комбінований), а також тип реалізації зворотного зв'язку – від повної його відсутності до використання сенсорних систем з цифровою обробкою сигналів.

У виборі типу захвату ключову роль відіграють як технічні характеристики об'єкта (геометрія, вага, міцність, стабільність на опорі), так і зовнішні умови експлуатації: рівень вібрацій, температура, вологість, а також можливість автономної або дистанційної роботи. Враховуючи зазначене, в рамках даної роботи основний акцент зроблено на конструкціях з адаптивними можливостями, що забезпечують точну, контрольовану й безпечну взаємодію з об'єктами, які можуть становити загрозу для оператора або довкілля.

У роботизованих системах маніпулювання об'єктами, що характеризуються підвищеною нестабільністю або потенційною небезпекою, виникає цілий комплекс складностей, які значно ускладнюють управління захватом. На відміну від звичних задач, де робот працює з фіксованими, стандартизованими тілами, робота з нестійкими, частково непередбачуваними

або ризикованими предметами вимагає не лише точності, а й гнучкого, адаптивного підходу до контакту [17].

Об'єкти, які умовно відносяться до категорії небезпечних, можуть мати різну природу. Це, зокрема, об'єкти, що викликають хімічну або механічну реакцію при надмірному навантаженні; об'єкти, які деформуються або руйнуються навіть при незначному перевищенні зусилля; об'єкти без фіксованої форми або стабільної структури. Прикладами можуть бути рідини в легких контейнерах, сипучі матеріали, крихке скло або органічні біооб'єкти.

Невід'ємною частиною цього процесу є система керування. Вона повинна забезпечувати не лише реакцію на поточний стан, а й прогнозування наслідків взаємодії. У типовому варіанті керування використовується мікроконтролер, що працює у зв'язці з ПІ- або ПІД-регулятором, який дозволяє динамічно коригувати траєкторії, швидкість та зусилля на основі зворотного зв'язку з сенсорних каналів (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Блок-схема взаємодії захватного пристрою

Усі наведені дослідження сформували основу для вибору архітектури, функціонального призначення та принципів роботи захватного пристрою, розробка якого здійснюється в межах цієї кваліфікаційної роботи.

## 2 АНАЛІЗ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ МАНІПУЛЯТОРА

В даній роботі пропонується розробити роботизовану руку для знешкодження небезпечних предметів. Роботизована рука з трьома ступенями свободи була розроблена за допомогою мікроконтролера, запрограмованого за допомогою програмного забезпечення інтегрованого середовища розробки (MPLAB) [18], пов'язаного з камерою, яка передає відео шляхом спостереження за сценою на моніторі.

Система активується за допомогою пульта дистанційного керування, тим самим забезпечуючи лінію оборони людським життям і запобігаючи втраті перевіреного і перевіреного персоналу.

### 2.1 Аналіз апаратної бази

Система складається з апаратного модуля та прикладної програми для мікроконтролерного блоку, розробленого з використанням програмного забезпечення інтегрованого середовища розробки Microchip Programmable Intelligent Computer Laboratory (MPLAB).

Апаратний модуль складається з чотирьох відділень: блоку живлення, пульта дистанційного керування, робота та камери. Система є мехатронною системою, в якій використовується імпровізована платформа з іграшкового автомобіля, а роботизована рука, виготовлена з легкого пластику для полегшення руху.

Електрична частина є основною платою управління рухом двигуна, а також захопленням і відпусканням предметів. Схема передавача, а також блок живлення для розподілу електроенергії. У той час як комп'ютер бере на себе частину програмування системи.

На рис. 2.1 представлена функціональна схема роботизованої руки для знешкодження небезпечних предметів.

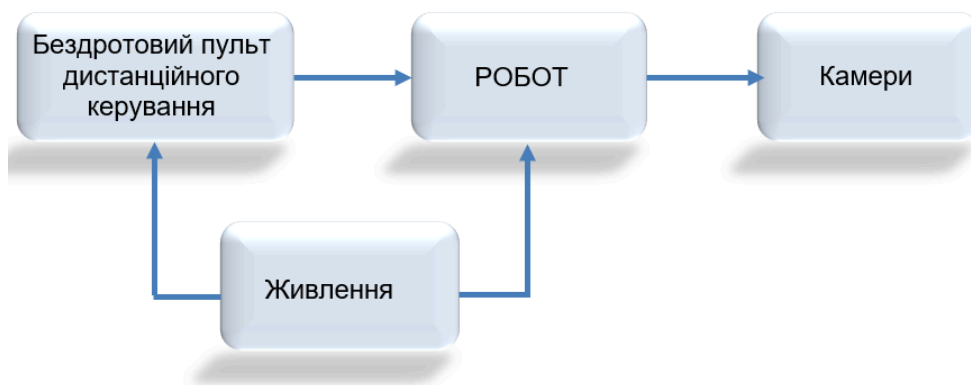


Рисунок 2.1 – Функціональна схема роботизованої руки для знешкодження НО

### 2.1.1 Живлення

Схема електроживлення була побудована для подачі живлення в ланцюг. Джерело вхідної напруги становить 12 В, тоді як схема потребує лише 5 В. Тому для забезпечення регульованої напруги 5 В постійного струму використовувався регулятор напруги (LM7805) від нерегульованої вхідної напруги 12 В. Тоді конденсатор використовувався для стабілізації подачі напруги та зменшення пульсацій джерела напруги. Схему живлення показано на рис. 2.2.

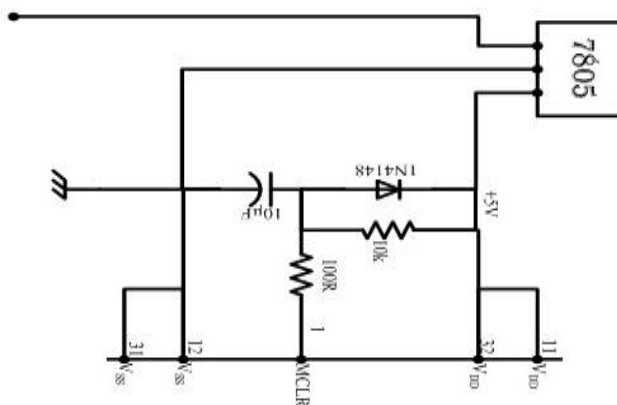


Рисунок 2.2 – Схема електроживлення

Для зарядки напруги акумулятора також використовувався зарядний блок, використовувалася повнохвильова мостова схема випрямляча, як показано на рис. 2.3.

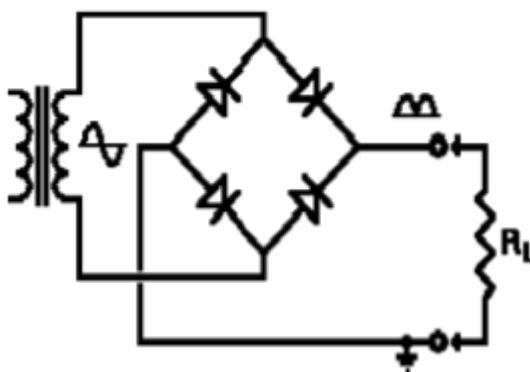


Рисунок 2.3 – Повнохвильовий мостовий випрямляч

Коли акумулятор повністю заряджений, зарядний пристрій автоматично переходить від зарядки постійною напругою до струминної зарядки. Літій-іонний акумулятор 18 В використовувався для зберігання зарядів та хімічної енергії, і він доступний за потреби.

Блок живлення знижує напругу 12 В до напруги 5 В; кожен на два мікроконтролери PIC16F628 (пульт дистанційного керування) та PIC16F877 (контролер головної плати). Напруга акумулятора 18 вольт регулярно заряджалася за допомогою ланцюга зарядки, яка заряджається близько 1 години і розряджається близько 2 годин під час роботи.

### 2.1.2 Пульти дистанційного керування

Призначення модуля дистанційного керування полягає в забезпеченні бездротового зв'язку між програмою керування та роботом. Пульт дистанційного керування складається з мікроконтролера PIC 16F628 (цей PIC використовувався, тому що він економічний і легкодоступний), R-F-передавача 315 МГц (він використовується тому, що легко поміщається в макетну плату і добре працює з мікроконтролером для створення дуже простого бездротового каналу передачі даних) і передавальної антени. Заявка на управління передається від передавача і приймається на роботу приймачем. PIC16F628 програмується за допомогою мови асемблера. На рис. 2.4 показана схема бездротового пульта дистанційного керування.





напругу на навантаження в будь-якому напрямку.

На рис. 2.6 показана ланцюг моста Н, при замиканні перемикачів S1 і S4, (S2 і S3 розімкнуті) на двигун буде подаватися позитивна напруга. При розмиканні перемикачів S1 і S4 і замиканні перемикачів S2 і S3 ця напруга змінюється на протилежну, забезпечуючи реверсивну роботу двигуна.

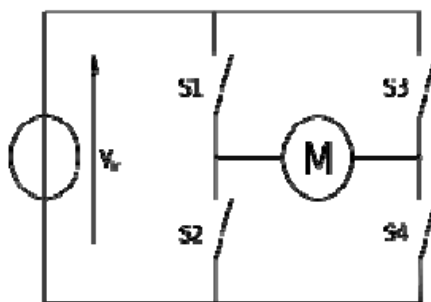


Рисунок 2.6 – Схема Н-моста

Перемикачі S1 і S2 ні в якому разі не повинні бути замкнуті одночасно, так як це призведе до короткого замикання на вхідному джерелі напруги. Те ж саме стосується і перемикачів S3 і S4. Цей стан відомий як простріл.

На рис. 2.7 показаний двигун постійного струму, а в таблиці 1 коротко описана його робота.



Рисунок 2.7 – Двигун постійного струму

Таблиця 2.1 – Робота двигуна постійного струму за допомогою H-моста

S1	S2	S3	S4	Результат
1	0	0	1	Мотор рухається праворуч
0	1	1	0	Мотор рухається вліво
0	0	0	0	Вільний хід двигуна
0	1	0	1	Моторні гальма

### 2.1.6 Кроковий двигун

Для руки використовувався кроковий двигун. Контролер крокового двигуна генерує всі необхідні сигнали для керування та роботи крокового двигуна. Він також має штифт включення для включення/вимкнення двигуна та штифт напрямку для зміни напрямку. Мікросхема зберігає кількість портів мікроконтролера, які можна використовувати для інших цілей.

Рівняння для електричної частини [19]:

$$\frac{di_{as}}{dt} = \frac{1}{L_{ss}} (-r_s i_{as} + R_t \psi_m \omega_r \sin(R_t \theta_r) + u_{as}) \quad (2.1)$$

$$\frac{di_{bs}}{dt} = \frac{1}{L_{ss}} (-r_s i_{bs} + R_t \psi_m \omega_r \cos(R_t \theta_r) + u_{bs}) \quad (2.2)$$

Для механічної частини:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (2.3)$$

За другим законом Ньютона ми отримуємо:

$$J \frac{d^2 \theta_r}{dt^2} = T_e - B\omega_r - T_L \quad (2.4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - B\omega_r - T_L) \quad (2.5)$$

Загальна математична модель виходячи з вищезазначених формул:

$$\frac{di_{as}}{dt} = \frac{1}{L_{ss}} (-r_s i_{as} - \psi_m \omega_r \cos \theta_r + u_{as}) \quad (2.6)$$

$$\frac{di_{bs}}{dt} = \frac{1}{L_{ss}} (-r_s i_{bs} + \psi_m \omega_r \sin \theta_r + u_{bs}) \quad (2.7)$$

$$T_e = R \psi_m \{-i_{as} \sin(R_t \theta_r) + i_{bs} \cos(R_t \theta_r)\} \quad (2.8)$$

На наступному графіку (рис. 2.8) показано, як модель двигуна відстежує рух, коли вона прискорюється, зупиняється і повертається назад. Спочатку двигун починає обертатись у прямому напрямку через 5 секунд, а на 10-й секунді зупиняється. Потім він починає крутитись у зворотному напрямку, щоб повернутись у початкове положення [20].

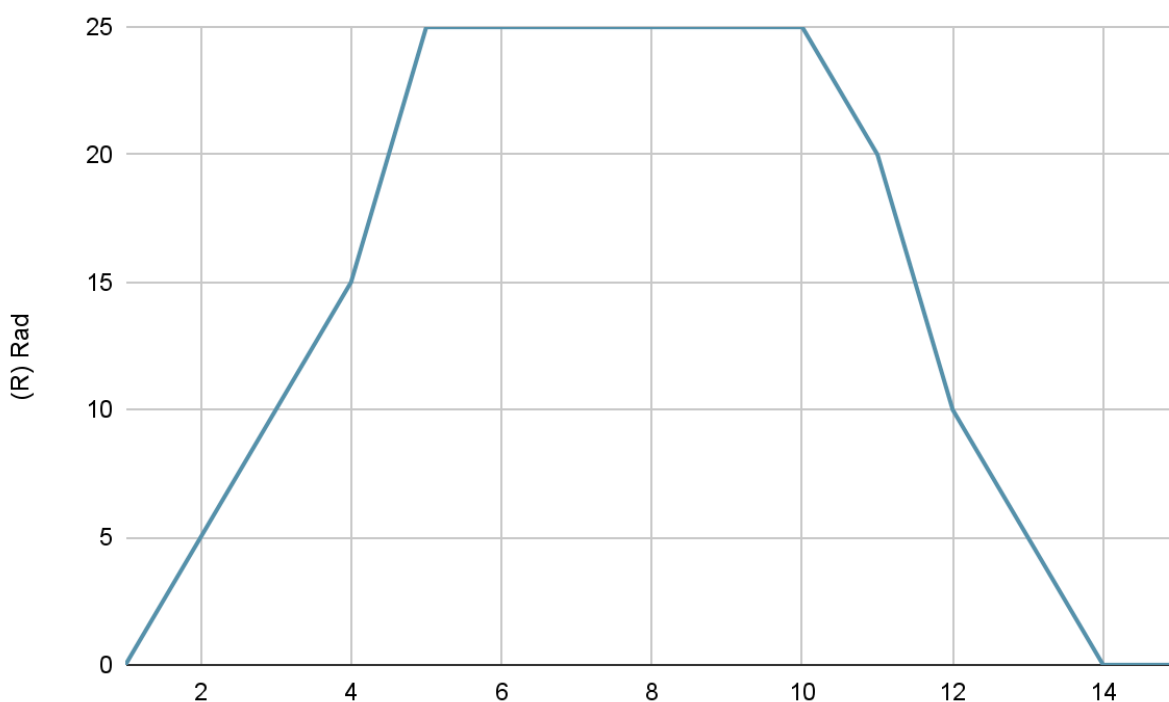


Рисунок 2.8 – Графік відстеження руху ротора

Власні індуктивності обмоток статора позначаються як:

$$L_{ss} = L_{asas} = L_{bsbs} = L_{sl} + L_m \quad (2.9)$$

### 2.1.7 Роботизована рука

Це роботизована рука з шарнірною рукою та 3 ступенями свободи. Він був розроблений з використанням металевих смуг. Він складається з серводвигуна (двигуна постійного струму) для плеча роботизованої руки. Цей двигун постійного струму встановлений на круглій пластині, на якій встановлені дві металеві смуги. У наступному суглобі, лікті, закріплений кроковий двигун, який відповідає за висоту звуку роботизованої руки. Цей кроковий двигун відповідає за вертикальне переміщення руки; Кінцеве з'єднання з'єднане з кроковим двигуном, який управляє рухом захвату. Захват має двопальцевий тип і може з легкістю піднімати предмети. На рис. 2.9 показана будова роботизованої руки разом з платформою.

Іншими використовуваними компонентами є: колеса, які є круглими компонентами, призначеними для обертання на осьовому підшипнику. Вони дозволяють легко переміщати предмети, полегшуючи переміщення або транспортування, підтримуючи вантаж.

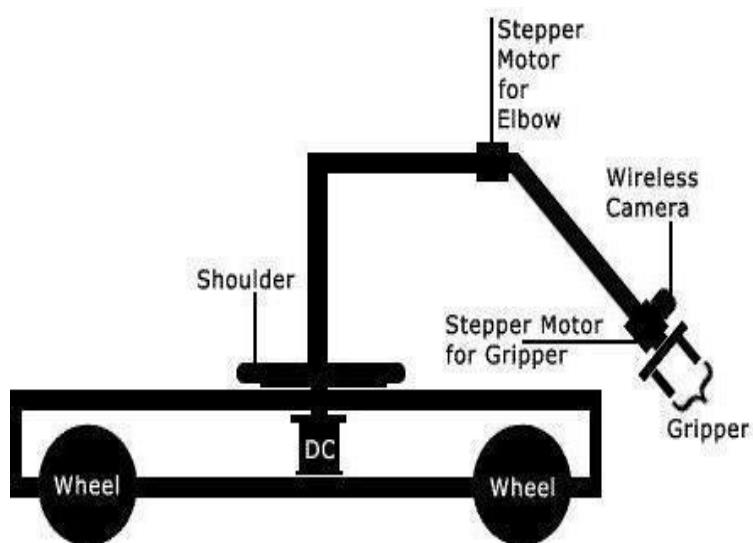


Рисунок 2.9 – Будова роботизованої руки [21]

Шестерні та ланцюги, які є механічними платформами, які забезпечують міцний і точний спосіб передачі обертального руху з одного місця в інше, можливо, змінюючи його на шляху.

Зміна швидкості між двома передачами залежить від кількості зубів на кожній передачі. Коли шестерня з приводом проходить повне обертання, вона тягне ланцюг на кількість зубів на цій шестерні. Реле постійного струму також використовується для управління двигуном постійного струму за сигналами мікроконтролера.

Відповідне вольтове реле було використано для забезпечення ізоляції мікроконтролера від двигуна постійного струму, який може пошкодити контролер, споживаючи великий струм.

## 2.2 Програмне забезпечення

Програмне забезпечення для цього проекту було розроблено з використанням простої низькорівневої мови, яка є мовою асемблера. Для розробки програми для мікроконтролерів 16F877 і 16F628 було використано програмне забезпечення інтегрованого середовища розробки Microchip Programmable Intelligent Computer Laboratory (MPLAB). Програмне забезпечення MPLAB IDE забезпечує простоту розробки програмного забезпечення, раніше небачену на ринку 8-бітних мікроконтролерів.

MPLAB IDE – це додаток на базі Windows®, який містить: інтерфейс для інструментів налагодження, симулятор, програматор і емулятор і внутрішньосхемний налагоджувач (продається окремо), повнофункціональний редактор, менеджер проектів, настроювана панель інструментів і зіставлення клавіш, рядок стану, он-лайн довідку.

MPLAB IDE має такі функції, як редагування вихідних файлів, збірка в один дотик (або компіляція) і завантаження на мікроемулятор і симулятор PIC (автоматично оновлює всю інформацію про проект). Налагодження виконується за допомогою вихідних файлів, абсолютного файлу списку та машинного коду.

Можливість використання MPLAB IDE з декількома інструментами налагодження дозволяє користувачам легко перемикатися з економічно ефективного симулятора на повнофункціональний емулятор з мінімальним перенавчанням. Частина програми наведена нижче.

START

```
BANKSEL TRISA
CLRF TRISA
CLRFTRISB
MOVLW 0XF0
MOVWF TRISC
CLRF TRISD
CLRFTRISE
MOVLW 0X86
MOVWF ADCON1
BSF PIE1,5
BANKSEL PORTA
CLRFPORTA
CLRFPORTB
CLRFPORTC
CLRFPORTD
CLRFPORTE
CLRFTEMP3
CALL SERIAL1
MOVLW 0XC0
MOVWF INTCON
```

### 2.3 Принцип роботи

Принцип роботи бездротового робота для утилізації об'єктів можна зрозуміти через його базову систему роботи з використанням системної схеми потоку даних і відеозворотного зв'язку.

Від бездротового блоку дистанційного керування R-F передавач частоти 315 МГц передає сигнали на головну друковану плату. Кожен вхід адреси/даних може бути встановлений в один з двох логічних станів. Запрограмовані адреси / біти даних з PIC16F628 передаються з передачею R-F. А передавальний антена,

позначена як T-X Антена, потім надсилає сигнали через приймальну антену R-X на мікроконтролер PIC16F877 на головній платі, який декодує сигнал для виконання відповідних інструкцій.

Для блоку робота R-F приймач отримує надіслані сигнали від модуля R-F приймача на частоті 315 МГц через антену R-X, PIC16F877 мікроконтролер виконує інструкції, що передаються з PIC16F628, мікроконтролер використовує мову асемблера для програмування, яка виконує введення даних, необхідних для двигунів (серводвигунів), і виконує інструкції щодо напрямку, а потім руху робота.

Управління двигунами (серводвигуном) здійснюється за допомогою необхідних інструкцій, які дозволяють колесам автомобіля рухатися, а також роботизованій руці рухатися в необхідному напрямку. Схема потоку даних системи виглядає так, як показано на рис. 2.10.

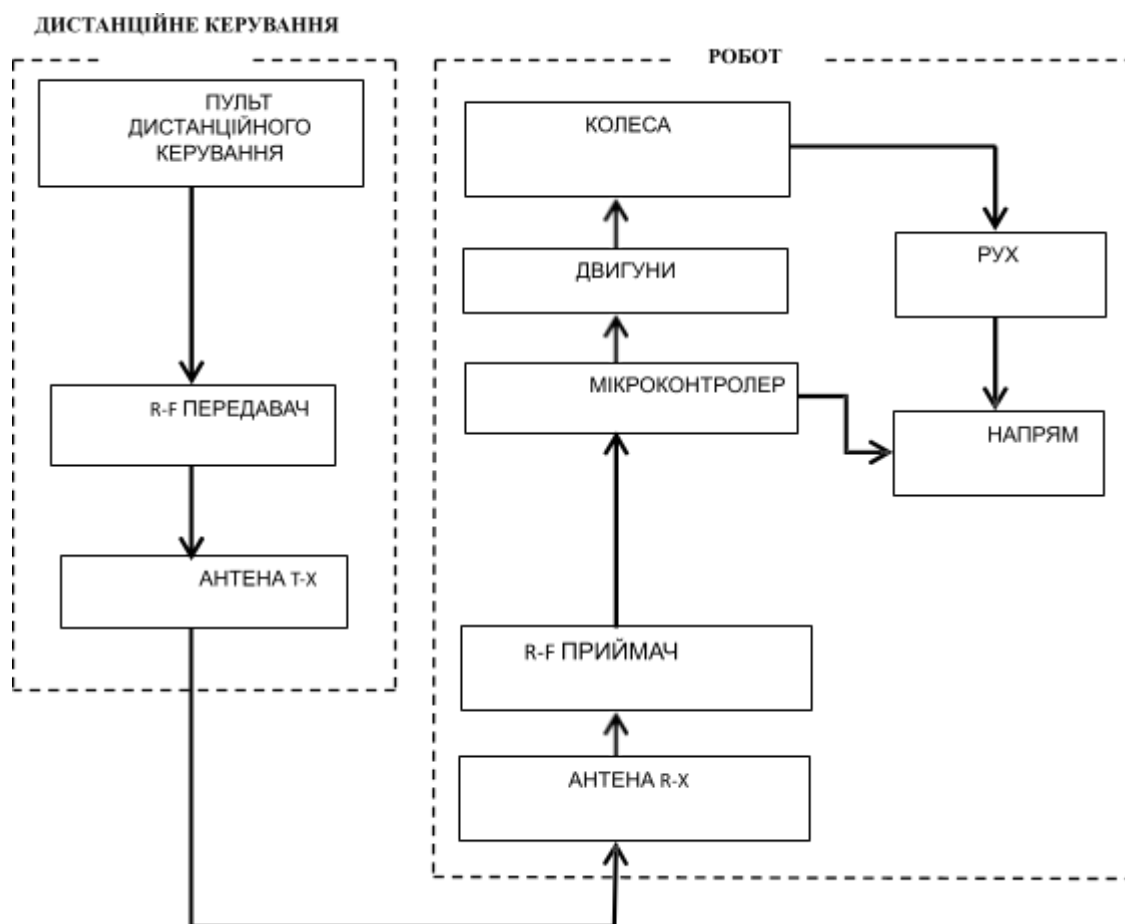


Рисунок 2.10 – Діаграма потоку даних системи

При включеному і працюючому блоці управління процес управління роботом буде протікати за наступним принципом:

- бездротовий віддалений користувач надсилає командний сигнал на приймач робота;
- робот-приймач приймає командний сигнал, що надсилається з бездротового пульта дистанційного керування користувача;
- робот-приймач декодує сигнал і відправляє команду на мікроконтролер;
- мікроконтролер віддає команду деталям робота, таким як колеса і двигуни, на рух і напрямок відповідно.

## 3 РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХВАТНОГО ПРИСТРОЮ

### 3.1 Обґрунтування ідеї проекту

Ідея даного проекту полягає у створенні захватного пристрою, призначеного для маніпулювання небезпечними об'єктами. Основна мета – розробити механізм, здатний одночасно забезпечувати делікатний, м'який дотик до крихких чи нестабільних предметів, та при необхідності – достатню жорсткість для їх надійного утримання під час переміщення.

Таке поєднання характеристик є критично важливим у ситуаціях, коли йдеться про роботу з об'єктами підвищеної небезпеки – зокрема, це можуть бути скляні ємності, хімічні акумулятори, лабораторні зразки або компоненти, чутливі до тиску та деформацій. Надмірне стискання може призвести до їх пошкодження, а недостатнє – до випадкового випадіння або втрати контролю над об'єктом.

Для досягнення такого ефекту в конструкцію захватного пристрою було вирішено додати м'які вставки у вигляді еластичних кульок. Завдяки своїм властивостям вони забезпечують м'який контакт з об'єктом під час захоплення, розподіляючи тиск по поверхні та знижуючи ризик пошкодження. При збільшенні сили стискання кульки деформуються, створюючи додатковий опір і, відповідно, підвищуючи жорсткість захоплення. Це дозволяє досягнути адаптивної поведінки захвату в залежності від фізичних характеристик об'єкта: чим м'якше потрібно захопити – тим слабше стискання, і навпаки.

Як базову конструкцію було обрано трьохпальцевий тип захвату. Така конфігурація є оптимальною з точки зору простоти реалізації та водночас достатньою для надійного утримання більшості об'єктів різної форми та розміру. Кожен із трьох пальців має три сегменти (фаланги), що дозволяє імітувати анатомічну гнучкість людської руки. Така структура забезпечує хорошу рухливість і адаптацію до форми об'єкта під час захоплення,

підвищуючи точність та стабільність маніпуляцій.

Для забезпечення гнучкості та мобільності кожного пальця було прийнято рішення використати кулькове з'єднання між фалангами. Такий тип з'єднання забезпечує високу ступінь свободи руху, що є ключовим фактором при роботі з об'єктами складної форми або нестандартного розміру. Кульки розташовуються між фалангами й відіграють подвійну роль: по-перше, вони виступають в ролі механічного з'єднувача між окремими сегментами, по-друге – дозволяють кожній фаланзі вільно обертатися або нахилитися в різних напрямках. Це дозволяє уникати обмежень, притаманних традиційним шарнірним або петльовим з'єднанням, і забезпечує більш плавний, органічний рух, подібний до того, який має людський палець.

Завдяки цьому конструктивному рішенню захватний пристрій може точніше підлаштуватися під форму об'єкта, рівномірно розподіляти зусилля при захопленні та зменшувати ризик пошкодження як самого об'єкта, так і елементів захватного механізму. Крім того, кулькове з'єднання спрощує реалізацію конструкції з можливістю подальшої модифікації – як з точки зору механіки, так і керування рухами кожної фаланги.

Таким чином, запропонована ідея базується на створенні універсального захватного механізму з адаптивними властивостями, який може безпечно та ефективно взаємодіяти з широким спектром об'єктів – як крихких, так і твердих.

### 3.2 Створення захватного пристрою

Розробка захватного пристрою розпочалась із створення його тривимірної моделі у середовищі проектування Fusion 360 [22]. Вибір саме цього програмного забезпечення був обумовлений його широкими функціональними можливостями, які дозволяють не лише конструювати окремі деталі, але й збирати повноцінні асемблії, моделювати механічні з'єднання та аналізувати майбутню поведінку конструкції в динаміці. Це особливо важливо в контексті

створення механізму, призначеного для роботи з небезпечними об'єктами, де точність, гнучкість і надійність мають ключове значення.

Основна концепція пристрою полягала у створенні захвату, який здатен взаємодіяти з делікатними або небезпечними об'єктами – такими як скло, тонкі конструкційні елементи тощо. Завданням було не лише забезпечити надійне утримання предмета, а й гарантувати, що сам процес захоплення буде максимально м'яким і безпечним. Тому ще на етапі проектування було враховано необхідність інтеграції пом'якшуючих елементів у зону «подушечок» пальців – саме ці ділянки контактують із поверхнею об'єкта.

Першим кроком стало створення ескізів для фаланг пальців, які мали стати основними структурними елементами захватного механізму. Усі ескізи розроблялись з урахуванням майбутнього руху кожної фаланги відносно іншої, що дозволяє імітувати принцип згинання людських пальців. Така сегментована структура дозволяє значно точніше повторювати форму об'єкта при захопленні та забезпечує адаптивність рухів. Кожна фаланга виконує функцію окремого шарнірного модуля, здатного змінювати своє положення під дією приводу або зовнішньої сили, що значно підвищує гнучкість пристрою.

На основі створених ескізів були виготовлені об'ємні 3D-моделі фаланг (рис. 3.1), які пізніше лягли в основу повної конструкції захватного пристрою. Особлива увага приділялась точності формування місць з'єднання між фалангами – саме вони відповідальні за динаміку руху пальців і забезпечують функціональність майбутнього механізму.

Після створення окремих фаланг постало питання про вибір оптимального способу їх з'єднання, який би забезпечив необхідну гнучкість та мобільність. Було прийнято рішення використовувати кулькове з'єднання (рис. 3.2) – конструктивне рішення, при якому між двома фалангами розміщується кулька, що слугує опорною точкою. Навколо цієї кульки кожна фаланга має змогу вільно обертатись і згинатись у різних напрямках.

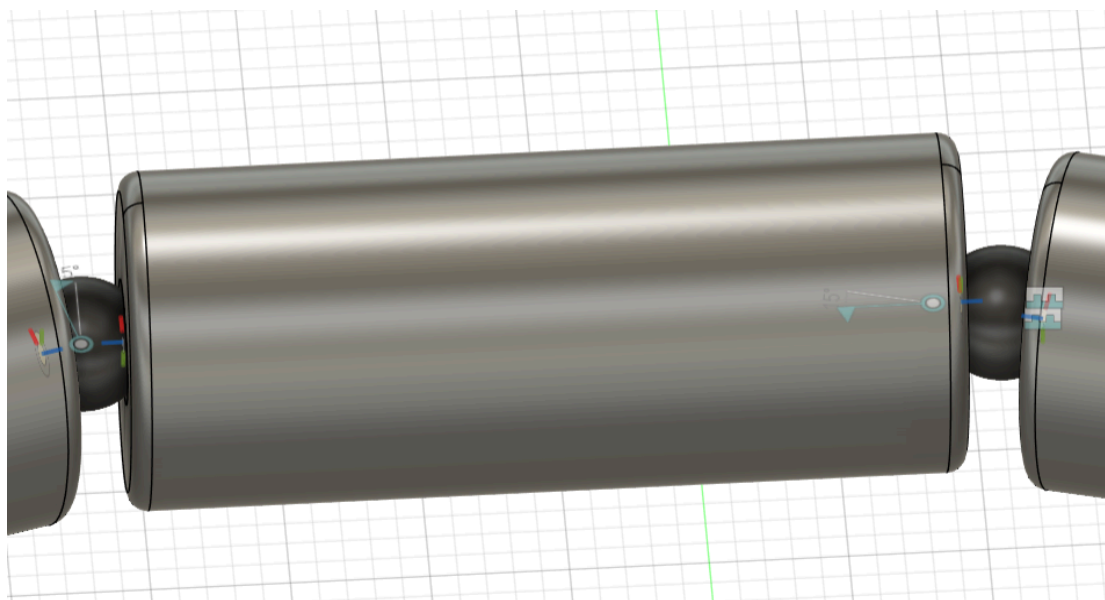


Рисунок 3.1 – Фаланга одного з пальців

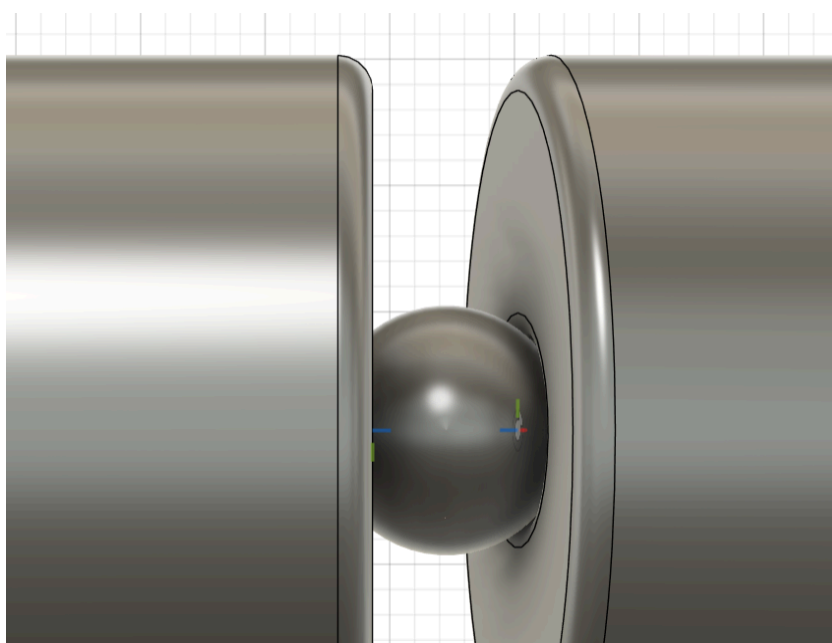


Рисунок 3.2 – Кулькове з'єднання між фалангами

Це дозволяє кожному пальцю імітувати природні рухи – зокрема, виконувати не тільки прямі згини вперед і назад, але й невеликі бокові відхилення, що є перевагою у порівнянні з традиційними шарнірними з'єднаннями. Завдяки такій конструкції підвищується здатність пальців адаптуватися до складних форм об'єктів, рівномірніше розподіляти навантаження при захопленні та зменшувати ризик пошкодження як об'єкта, так

і самого захоплювального пристрою.

Фаланги можуть бути встановлені на кулькове з'єднання шляхом вставлення сферичної головки у відповідне гніздо з еластичного або жорсткого матеріалу, що утримує кульку з легким натягом. Для забезпечення надійної фіксації та запобігання випадінню, можуть застосовуватись стопорні кільця або защіпки, які механічно блокують кулю всередині гнізда, не обмежуючи її свободу руху. Така конструкція дозволяє утримувати фалангу на місці та забезпечує обертання у кількох напрямках одночасно.

Реалізація руху фаланг у цій конструкції може здійснюватися за допомогою тросової системи керування. Через внутрішню частину фаланги та корпусу проходять гнучкі троси, які кріпляться до кожної з фаланг окремо. Інший кінець кожного троса під'єднаний до приводу, що розташований у базовій частині конструкції. При натягуванні троса приводом фаланга здійснює обертальний рух у заданому напрямку навколо кульки. Така система дозволяє здійснювати точне керування рухом кожної фаланги, забезпечуючи гнучкість, адаптивність до об'єктів складної форми та високий ступінь контролю, що є особливо важливим під час взаємодії з небезпечними або крихкими предметами.

Для реалізації гнучкої та функціональної конструкції кожного окремого пальця захватного пристрою було виготовлено три окремі фаланги. Така трьохсегментна структура дозволяє досягти високого рівня згинання, що критично важливо для захвату об'єктів різної форми, розміру та крихкості. Кожна фаланга має можливість змінювати своє положення незалежно від інших, створюючи рух, максимально наближений до руху людського пальця. Саме така анатомічна логіка побудови конструкції дає змогу гнучко адаптуватися до складних контурів об'єкта, що захоплюється.

Для з'єднання цих трьох фаланг між собою було виготовлено дві кульки, які розміщуються в точках контакту між фалангами:

- 1) перша кулька – між першою та другою фалангою;
- 2) друга кулька – між другою та третьою фалангою.

Окрім цього, для з'єднання першої (основної) фаланги з кріпленням пальця, що фіксується на основному корпусі захватного пристрою, була створена третя кулька, яка також виконує роль універсального шарніра. Це з'єднання забезпечує ще один ступінь свободи для руху всієї конструкції пальця відносно основи (рис. 3.3).

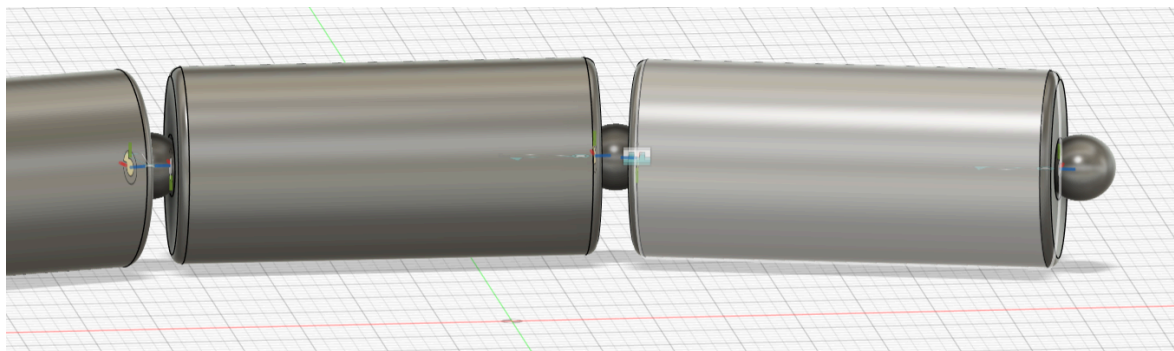


Рисунок 3.3 – З'єднання між фалангами

Таким чином, загалом на один палець припадає:

- 1) три фаланги (основа конструкції);
- 2) три кулькових з'єднання, що забезпечують повноцінну артикуляцію кожної фаланги.

Ця система дає змогу забезпечити максимально точне поєднання фаланг між собою, що гарантує плавний та контрольований рух. Усі фаланги "сідають" на кульки з високою точністю, що мінімізує люфти та механічні зазори. Це надзвичайно важливо при роботі з нестабільними або небезпечними об'єктами, де навіть мінімальне зміщення чи неконтрольований рух може мати критичні наслідки.

Після завершення побудови основної трисекційної конструкції одного пальця з використанням кулькових з'єднань, наступним логічним етапом стало модифікування форми останньої фаланги, аби вона краще відповідала формі реального людського пальця. Така трансформація дозволила не лише зробити конструкцію більш ергономічною, але й значно покращити якість захоплення об'єктів, особливо в умовах, коли потрібна висока точність та делікатність.

Було прийнято рішення переробити геометрію останньої фаланги, додавши їй характерні вигини й округлості, які притаманні кінчику пальця людини. Це дозволило досягти більшої площі контакту при торканні об'єкта, тим самим зменшуючи точковий тиск та підвищуючи надійність утримання.

В межах цієї ж модифікації було реалізовано ключову особливість усього проекту – систему м'якого захоплення. На кінцеву площину останньої фаланги, яка виконує роль аналогічну подушечці пальця людини, було закріплено м'які деформовані кульки, виготовлені з гнучкого матеріалу (наприклад, силікону, або іншого з подібними властивостями). Ці кульки розміщувались на різних площинах останньої фаланги, що дозволяє покривати якомога більшу частину об'єкта при захопленні.

М'які кульки (рис. 3.4) виконують амортизуючу функцію – при стисненні вони деформуються, підлаштовуючись під форму об'єкта.

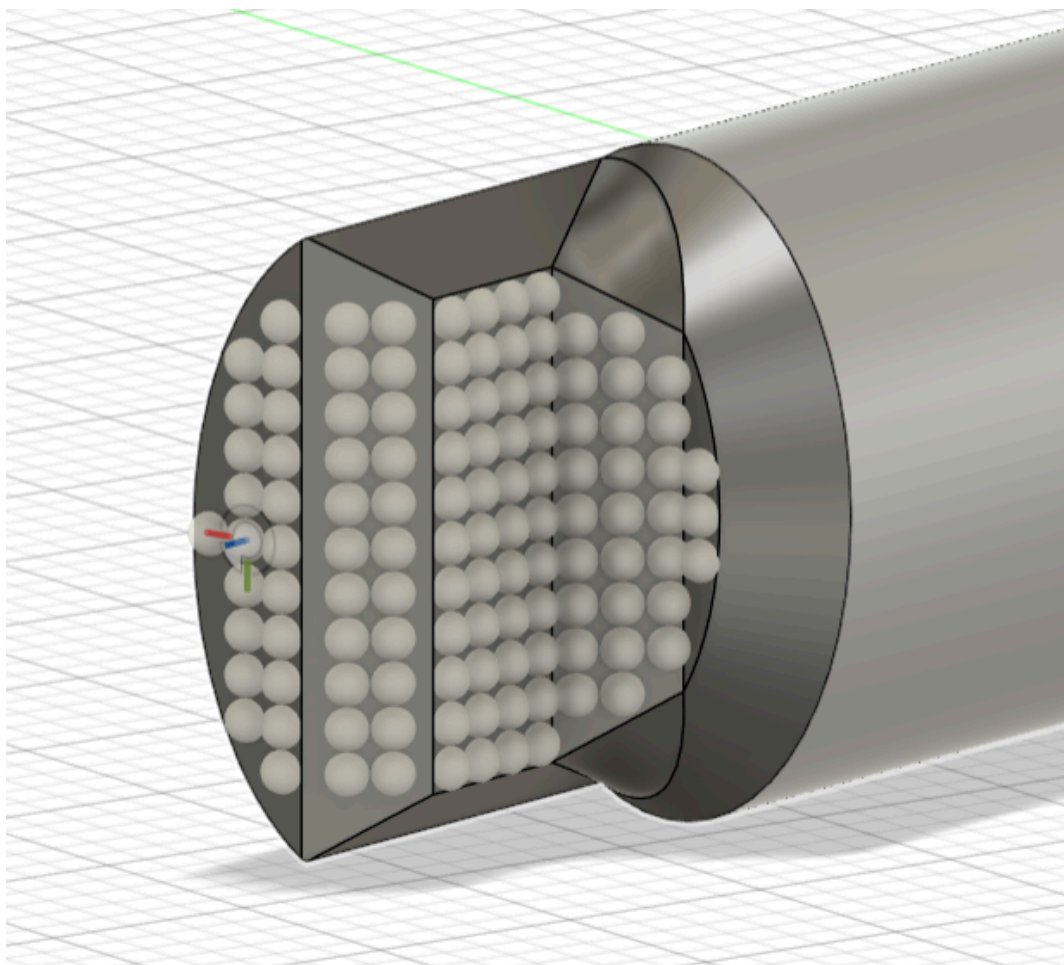


Рисунок 3.4 – Поверхня кінцівки пальця

Таким чином, навантаження розподіляється рівномірно по всій контактній площі, що суттєво знижує ризик пошкодження об'єкта. Ця властивість є критично важливою при роботі з тендітними або небезпечними матеріалами, такими як тонке скло, мініатюрні електронні компоненти чи акумуляторні батареї, де навіть незначне надмірне зусилля може призвести до поломки або аварійної ситуації.

Крім цього, наявність м'яких кульок дозволяє пристрою краще "обіймати" поверхню об'єкта, забезпечуючи контакт не лише в одній точці, а у кількох, що створює більш стабільний та контрольований захват, навіть у випадку нерівномірної або складної геометрії об'єкта.

Таким чином, система м'якого захоплення, розташована на подушках пальця, стала однією з центральних частин конструкції, яка дозволяє поєднати гнучкість, безпечність та функціональність у роботі з різними типами об'єктів.

На цьому етапі проектування та моделювання можна було впевнено стверджувати, що один з трьох запланованих пальців захватного пристрою був повністю розроблений (рис. 3.5). Було реалізовано повноцінну трисекційну конструкцію з використанням кулькових з'єднань між фалангами, модифіковано форму кінчика для кращого контакту з об'єктами, а також інтегровано елементи м'якого захоплення у вигляді деформованих кульок на подушечках останньої фаланги.

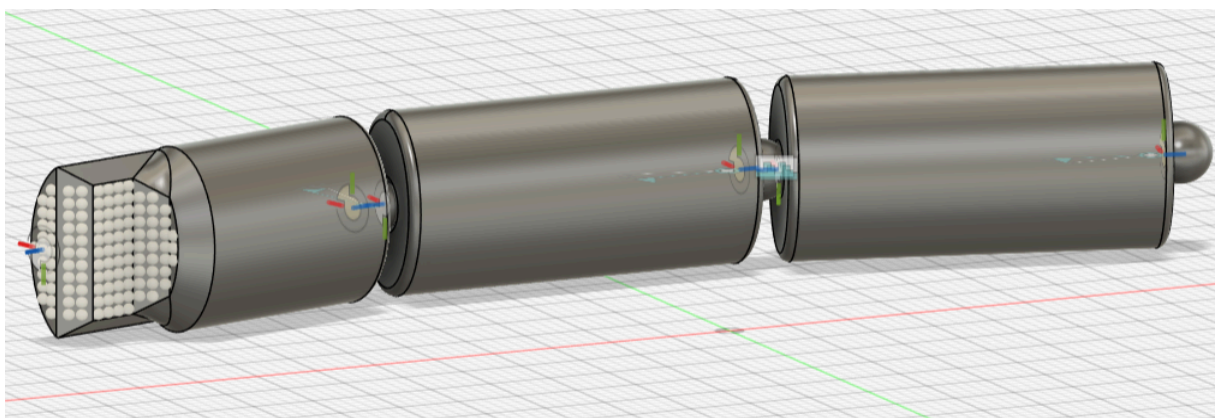


Рисунок 3.5 – Модель одного з пальців

Цей перший палець фактично став референсною моделлю, на основі якої було розпочато подальшу роботу над повним трьохпальцевим механізмом. Оскільки загальна конструкція для кожного пальця була уніфікованою – тобто всі вони повинні мати однакову будову, габарити та принцип дії – то розроблений палець дозволив чітко визначити стандарти і параметри для виготовлення ще двох аналогічних елементів.

Таким чином, наступним етапом стала підготовка до створення ще двох пальців, які разом із вже наявним утворять повноцінний трьохпальцевий захватний пристрій. Вибір саме трьох пальців був зроблений свідомо, оскільки трьох точок контакту з об'єктом цілком достатньо для стабільного та надійного захоплення більшості форм – від циліндричних до неправильної геометрії. Крім того, це дозволяє оптимізувати конструкцію в плані ваги, складності механіки та подальшого керування, не жертвуючи при цьому функціональністю.

На основі вже відпрацьованої структури першого пальця, виготовлення ще двох не вимагало суттєвих змін у дизайні (рис. 3.6), але стало наступним важливим кроком до завершення створення всієї захватної частини пристрою.

Після завершення геометричного моделювання одного пальця, важливим етапом стала перевірка працездатності конструкції в умовах віртуального середовища. Для цього у середовищі Fusion 360 було виконано повноцінне налаштування рухомих з'єднань (Joint), які дозволяють імітувати згинання фаланг пальця у просторі.

Для кожного пальця було створено окрему анімацію руху під заданим кутом, що дозволило візуально відслідкувати поведінку моделі під час роботи. Ключовою ідеєю було не просто обертання об'єктів, а моделювання реального принципу згинання пальця – тобто з фіксацією логіки руху кожної фаланги.

Рух між елементами був реалізований завдяки використанню кулькових з'єднань, розміщених між фалангами. Саме навколо цих кульок відбувається обертання наступної фаланги, що імітує природну траєкторію згинання пальця. При цьому для досягнення правильної кінематики було встановлено жорсткі з'єднання між кулькою та попередньою фалангою. Це означає, що кожна

наступна фаланга має ступінь свободи щодо обертання навколо кульки, в той час як попередня – фіксована відносно тієї ж кульки.

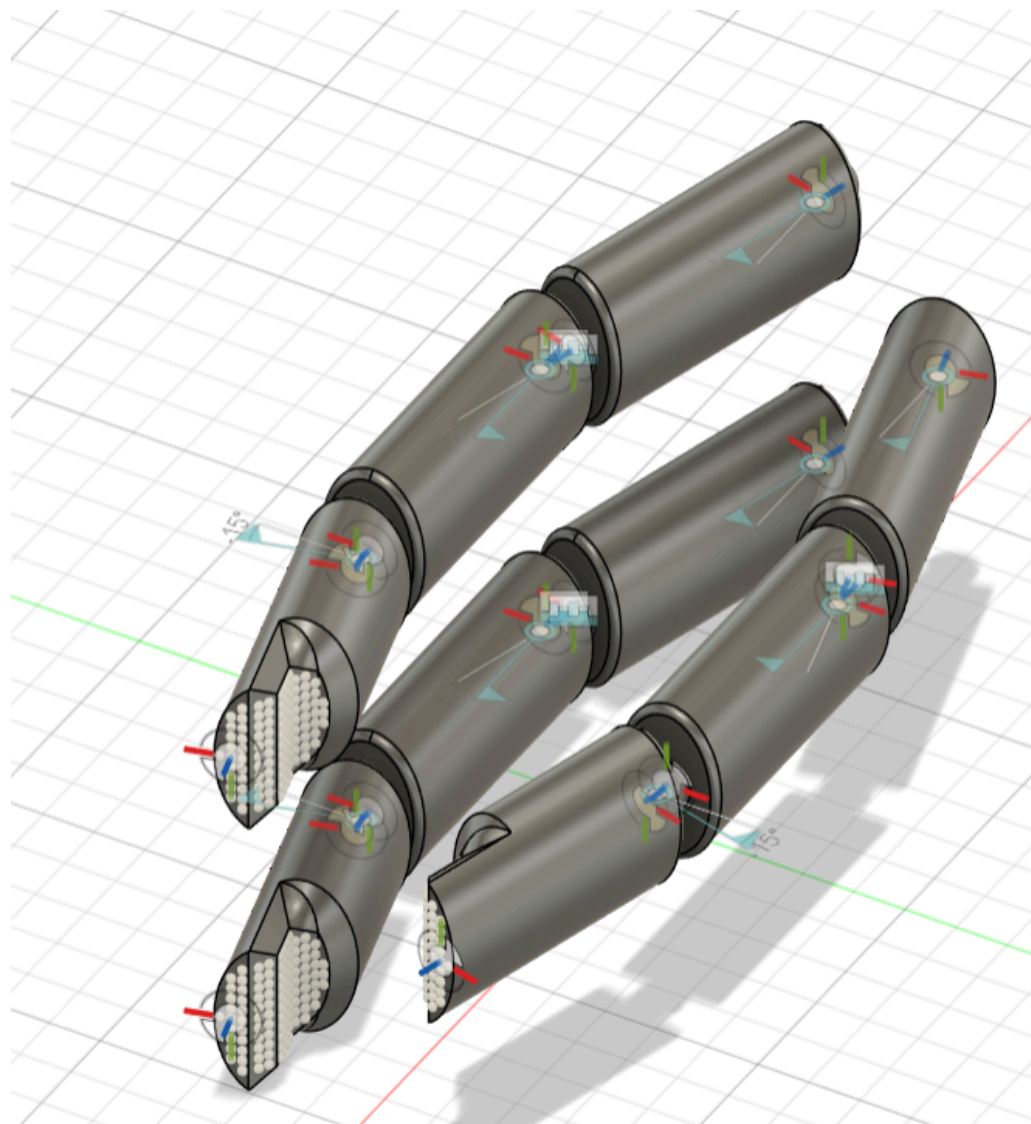


Рисунок 3.6 – Захватна частина пристрою

На завершальному етапі моделювання було проведено повноцінне тестування руху пальців за допомогою інструменту Motion Study у Fusion 360 (рис. 3.7). Цей етап мав на меті перевірити, наскільки ефективно і коректно працює вся механічна система згинання фаланг. Для кожної фаланги були індивідуально задані параметри руху – зокрема, кути повороту та часові інтервали, що дозволило змоделювати послідовний рух пальця, максимально наближений до реального. Завдяки цьому вдалося наочно оцінити логіку руху

всіх трьох фаланг, взаємодію між кульковими з'єднаннями та самими сегментами конструкції. Також було перевірено, що жорсткі з'єднання працюють правильно: перша фаланга залишалася фіксованою, а наступні рухалися відносно кульок, що імітує справжній згин пальця.

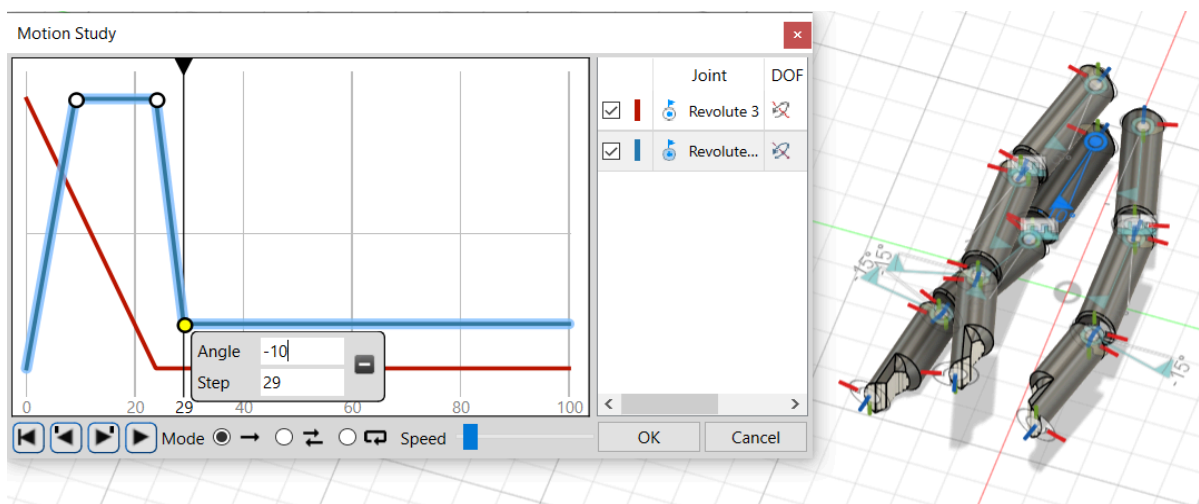


Рисунок 3.7 – Робота з Motion Study

Окрім самих пальців, була також розроблена спеціальна конструкція кріплення, яка слугує основою для фіксації трьохпальцевого захватного механізму. Кріплення було створене під певним кутом, що дозволяє покращити ергономіку та ефективність згинання фаланг під час захвату об'єкта (рис. 3.8). Такий кут розміщення забезпечує більш природній та функціональний напрям руху пальців, дозволяючи адаптуватися до різних форм і розмірів об'єктів. Конструктивно, на одній стороні кріплення були виконані два отвори, куди фіксувалися два пальці, а з іншого боку – один отвір для третього пальця. Це рішення дозволило раціонально розмістити всі три пальці, забезпечивши їхню оптимальну взаємодію при одночасному русі. Після встановлення всі елементи були перевірені на рухомість – усі пальці коректно закріпилися на своїх місцях, зберігаючи здатність згинатися.

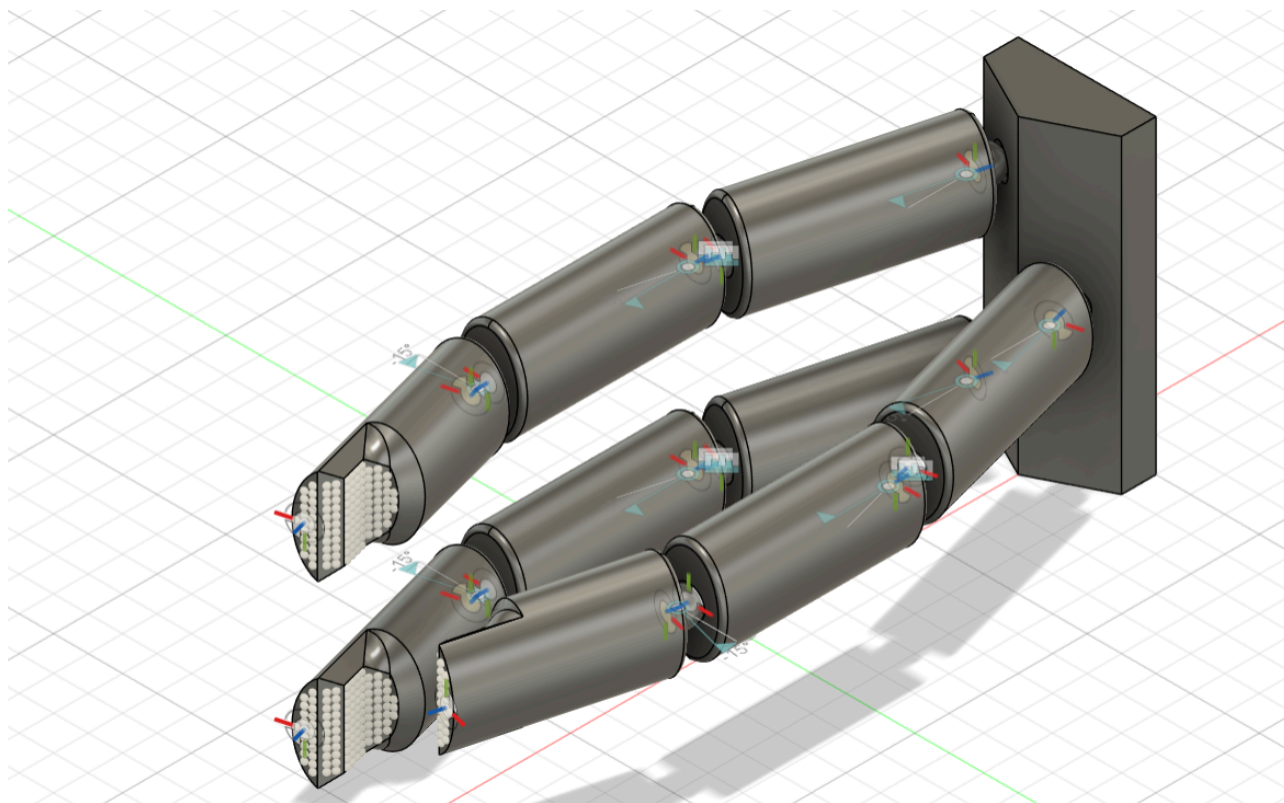


Рисунок 3.8 – Створене кріплення для пальців

Для демонстрації працездатності розробленого хватного пристрою виникла необхідність створення базової конструкції, яка б імітувала робочу руку робота та дозволила наочно показати рух та функціональність самого захвату.

З цією метою було розроблено просту, але функціональну опорну конструкцію. В її основу покладено кубічну платформу (рис. 3.9), яка виконує роль стабільного кріплення до поверхні – зокрема, до робочого столу, лабораторної поверхні або тестового стенду. Така форма дозволяє забезпечити стійкість конструкції та зручно закріпити її за допомогою затискачів, гвинтів або магнітів, у залежності від умов тестування.

До верхньої частини куба було додано кріплення з першою секцією руки. Таким чином, створена основа виконує не тільки демонстраційну функцію, але й дає змогу зручно тестувати захват.

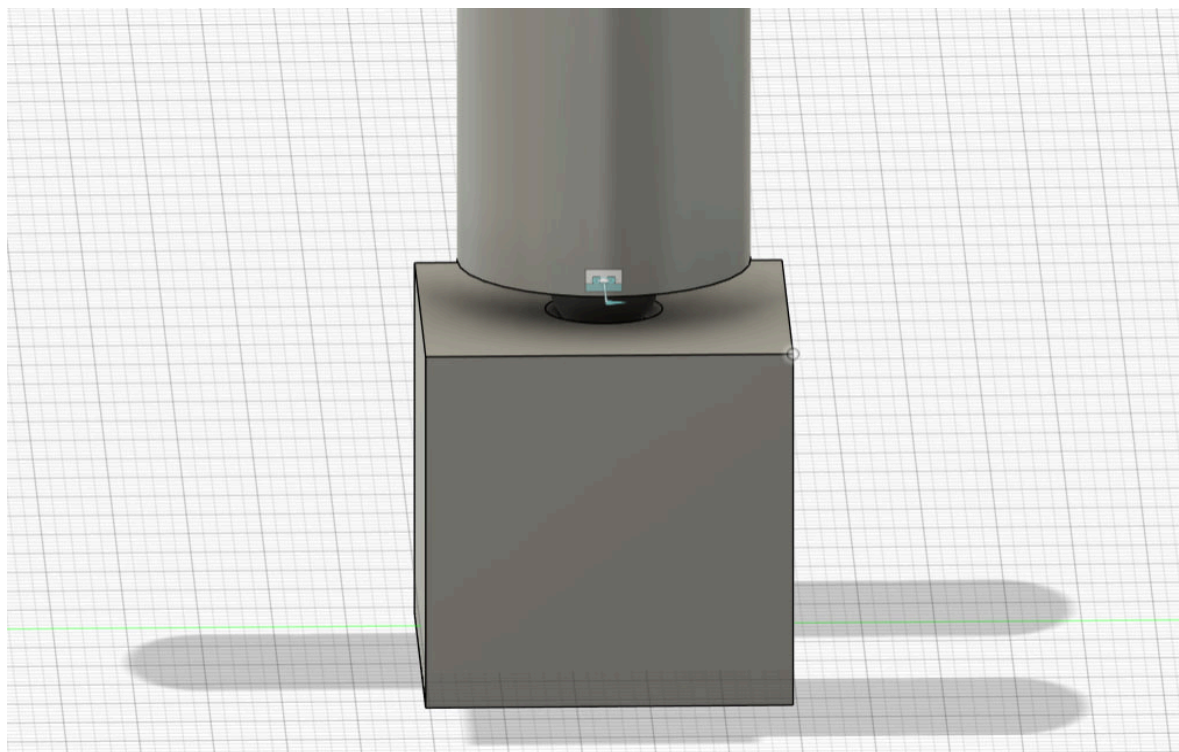


Рисунок 3.9 – Опорна конструкція для захватного пристрою

Наступним етапом стало створення рухомої частини руки, яка мала б імітувати базову свободу переміщення, необхідну для позиціювання захватного пристрою у просторі. Для цього було розроблено дві секції руки, які з'єднуються між собою за допомогою спеціального кріплення, що дозволяє згинання під кутом до 90 градусів (рис. 3.10).

Кожна секція виконана у вигляді жорсткої прямокутної конструкції, здатної витримувати навантаження від змонтованих пальців та забезпечувати достатню стабільність при демонстрації роботи захвату. Кріплення між секціями дозволяє реалізувати рух у вертикальній площині, тобто згинання «ліктьового типу», що є важливим елементом для симуляції справжнього маніпулятора.

Таке рішення дало змогу наблизити модель до реального прикладу роботизованої руки, де наявність декількох ступенів свободи дозволяє адаптуватися до положення об'єкта, а також продемонструвати потенційну можливість автономного або напівавтоматичного управління у майбутніх версіях проекту.

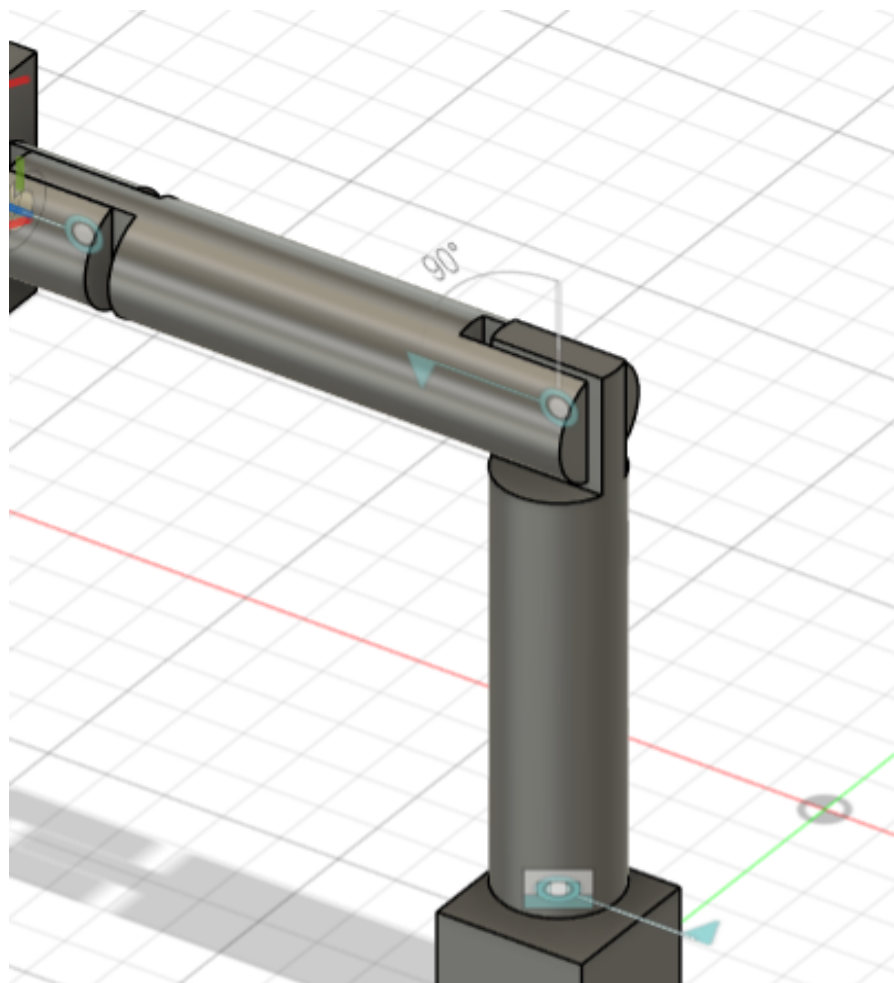


Рисунок 3.10 – З'єднання між елементами руки

Окрім згинання між двома секціями руки, для забезпечення додаткової рухливості самого хватного пристрою, на кріплення, до якого були встановлені три пальці, було додано окреме з'єднання (рис. 3.11), аналогічне до попереднього. Це дозволило самому захвату змінювати кут нахилу відносно кінцевої секції руки, зокрема здійснювати згинання під кутом до 90 градусів.

Таким чином, хватний пристрій набув ще одного ступеня свободи, що значно розширює його функціональні можливості – наприклад, захоплення об'єкта під нахилом або знизу, де стандартна орієнтація пальців була б недоступною. Це рішення зробило конструкцію більш гнучкою та наближеною до реальних технічних реалізацій маніпуляторів, які активно використовуються у промисловості для роботи з делікатними чи небезпечними об'єктами.

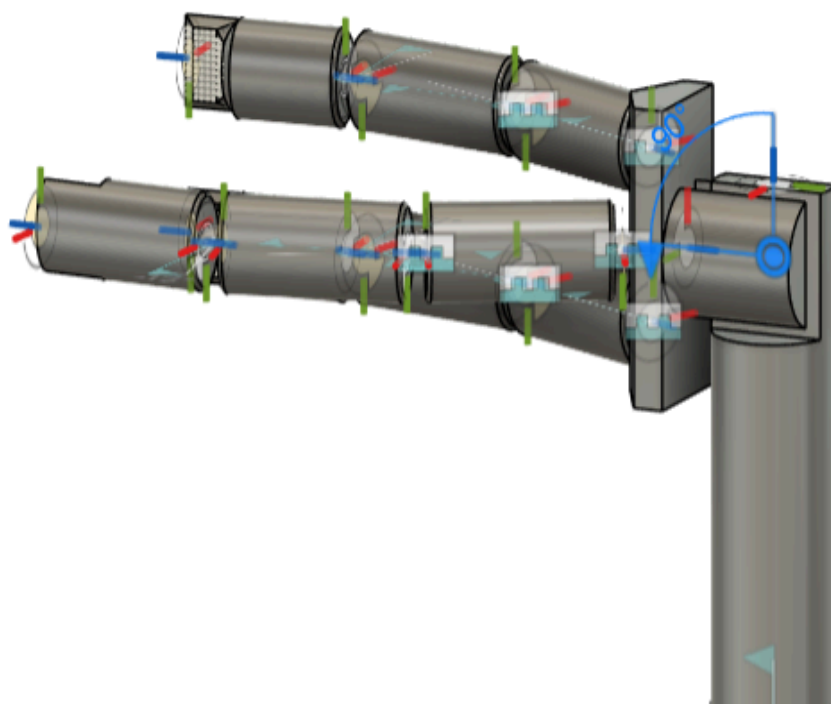


Рисунок 3.11 – З'єднання захватного пристрою з рукою

У результаті розробки було створено цілісну конструкцію (рис. 3.12), яка поєднує в собі всі елементи – основу, двосекційну рухому руку та сам захватний пристрій із трьома пальцями. Всі компоненти органічно поєднані між собою, утворюючи єдину, компактну та логічно цілісну систему, без візуальних або функціональних розривів.

Конструкція має рухливість завдяки продуманим з'єднанням у ключових точках: між секціями руки, а також між останньою секцією та захватом. Такий підхід дозволив забезпечити високий ступінь гнучкості в роботі, зберігаючи при цьому естетику і конструкційну завершеність пристрою.

У результаті проведеної роботи вдалося створити тривимірну модель захватного пристрою, яка здатна делікатно взаємодіяти з небезпечними або крихкими об'єктами. Завдяки продуманій конструкції пальців та використанню м'яких деформованих кульок на кінчиках фаланг, пристрій забезпечує м'який, але надійний захват, мінімізуючи ризик пошкодження об'єкта.

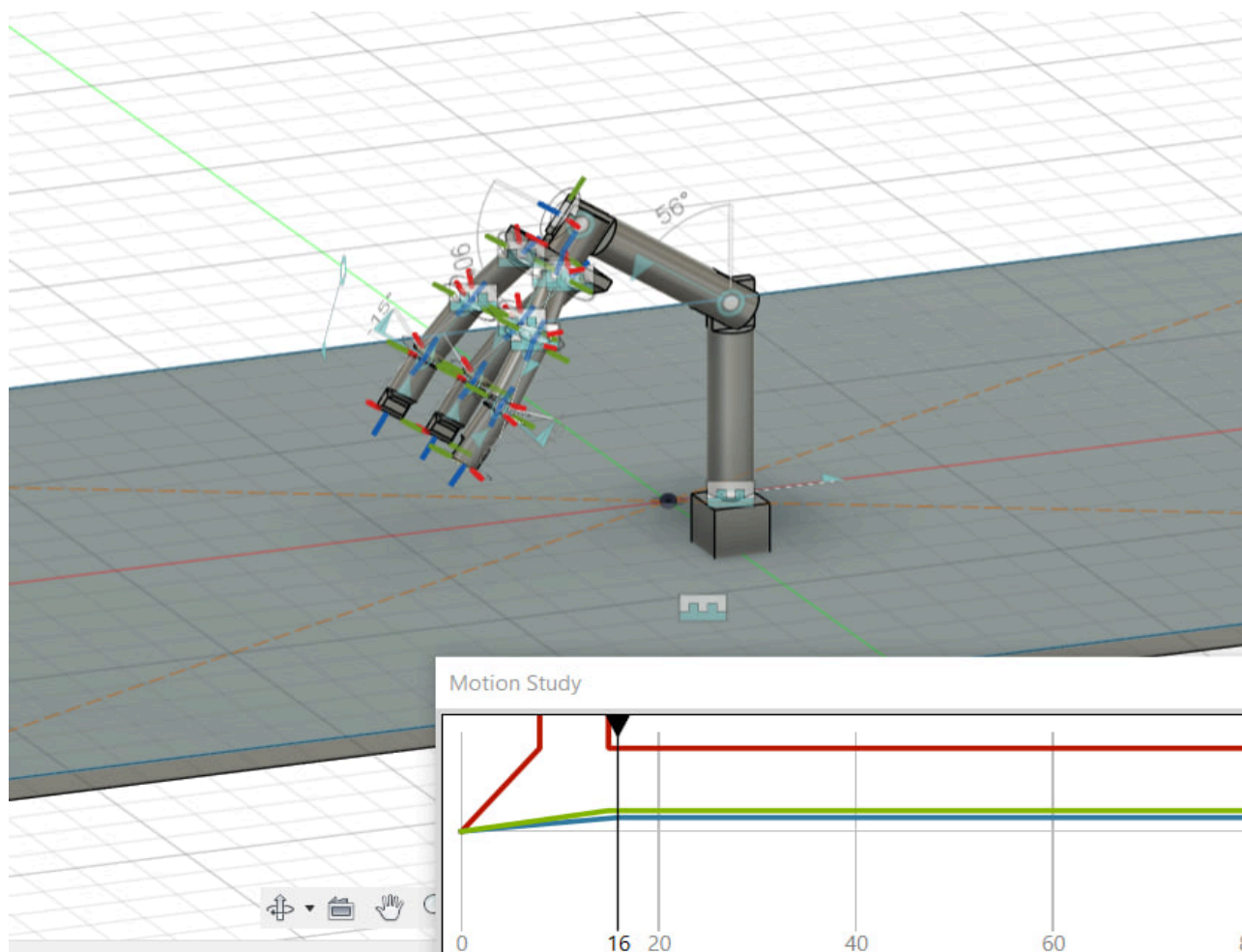


Рисунок 3.12 – Кінцевий вигляд захватного пристрою

### 3.3 Забезпечення безпечних умов праці при проектуванні захватного пристрою

У процесі виконання роботи значна частина часу була присвячена роботі за комп'ютером — зокрема, в середовищі тривимірного моделювання, під час аналізу конструкції, створення ескізів та візуалізацій. Така діяльність вимагає тривалого зорового навантаження, тому було важливо забезпечити належні умови для комфортної та безпечної роботи [23].

Одним із ключових чинників є якісне освітлення робочого місця. Щоб зменшити напруження очей, робота виконувалась при м'якому розсіяному освітленні, яке не створює відблисків на екрані та не спричиняє різких

перепадів яскравості в полі зору. Використання настільної лампи з теплою температурою світла дозволило зменшити втому під час тривалих сесій моделювання. Також було враховано природне освітлення приміщення, що забезпечує додатковий комфорт для зору у денний час.

Не менш важливою складовою стало ергономічне облаштування робочого місця. Монітор було встановлено на рівні очей, щоб уникнути нахилів голови та зайвого навантаження на шию. Крім того, періодично здійснювалися перерви з розминкою, під час яких очам надавався відпочинок, а м'язам — рухова активність. Це дозволяло уникнути типових проблем, пов'язаних із тривалим сидінням у статичній позі – зокрема, втоми, напруження м'язів спини та зниження концентрації [23].

Робота в середовищі проектування вимагає високої точності, тому було також приділено увагу налаштуванню обладнання — зокрема, яскравості та контрастності екрана, швидкості відгуку миші, а також стабільності системи, що забезпечувала безперебійну роботу без збоїв та відволікань.

Усе це – освітлення, поза, перерви, ергономіка – є складовими безпечної та продуктивної роботи при проектуванні технічних пристроїв. Завдяки дотриманню цих умов вдалося не лише ефективно організувати робочий процес, але й зберегти здоров'я на всіх етапах виконання проекту.

Під час виконання роботи особливої уваги потребувало дотримання основних рекомендацій при тривалій роботі за комп'ютером, адже моделювання конструкції захватного пристрою вимагало багатогодинної концентрації та точності. Одним важливим аспектом стало дотримання правильної постави. Робота над деталями захвату, а особливо – при побудові шарнірних елементів, вимагає тривалої нерухомості та концентрації, тому було важливо, щоб спина мала опору, плечі були розслаблені, а зап'ястя не знаходилися в напруженому положенні. Для цього використовувалося регульоване крісло з підтримкою попереку та правильним кутом нахилу сидіння [23].

Також важливо регулювати яскравість екрану відповідно до рівня освітлення в кімнаті. Під час створення моделі руки з двома секціями і анімації

її руху у Motion Study, яскравість екрана була встановлена таким чином, щоб не створювати зайвого контрасту, що могло б спричинити зорову втому. Крім того, використовувався режим «нічного освітлення» для зменшення синього світла, яке негативно впливає на очі при довгій роботі в темну пору доби.

Також слід відзначити важливість чистоти робочої поверхні та обладнання. Регулярне очищення монітора, клавіатури та миші стало обов'язковим елементом робочого процесу.

Загалом, дотримання базових правил гігієни праці за комп'ютером сприяло не лише збереженню здоров'я, але й підвищенню продуктивності при створенні складної і чутливої конструкції.

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було опрацьовано тему розроблення захватного пристрою мобільного робота для маніпулювання небезпечними об'єктами. Основна мета роботи полягала у створенні конструктивної моделі захватного механізму, здатного делікатно та ефективно взаємодіяти з крихкими або потенційно небезпечними об'єктами.

У рамках виконання поставлених завдань було реалізовано наступне:

- розроблено концепцію захватного пристрою, що передбачає м'який захват із використанням силіконових елементів для мінімізації тиску на об'єкт;

- створено тривимірну модель пальця із трьох фаланг, які з'єднані між собою кульковими з'єднаннями. Така конфігурація забезпечила плавний і гнучкий рух кожної частини пальця;

- проведено моделювання руху в середовищі Fusion 360 із використанням функцій Motion Study та Joint, що дозволило створити реалістичну візуалізацію згинання та руху фаланг у часі;

- модифіковано кінцеву фалангу пальця для підвищення ергономічності захоплення. На її кінці додано м'які силіконові кульки, розташовані на площинах, які відповідають подушкам пальців людини. Це дозволяє делікатно взаємодіяти з об'єктом, зменшуючи ризик пошкодження;

- створено кріплення для трьох пальців із логічним розташуванням отворів: два з одного боку та один з іншого, що дозволило встановити всі пальці з правильним кутом та перевірити їхню рухомість;

- один палець був повністю змодельований, після чого почалася робота з виготовлення ще двох аналогічних пальців для формування повноцінного трьохпальцевого захвата.

У результаті виконаних робіт вдалося досягти поставленої мети – створено детальну віртуальну модель захватного пристрою, який забезпечує надійний та м'який контакт із небезпечними або тендітними об'єктами.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Yevsieiev, V., & Demska, N. (2023). *Application of Generative Design Methods for Improving Manipulator Designs for Mobile Robots* (Doctoral dissertation, Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького).
2. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої [Електронний ресурс] / упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О.В Сичова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. електрон. вид. Харків : ХНУРЕ, 2023. 760
4. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.
5. Струтинський В.Б., Гуржій А.М. Наземні робототехнічні комплекси: Монографія. Житомир: ПП «Рута», 2023 . 524 с
6. Класифікація та види саморобних вибухових пристроїв / Ярославський А.В., Тьорло О.І., Йосипів Ю.Р., Курляк М.Д., Московчук М.О., Синенький В.М., – Львів: ЛьвДУВС, 2016. 87 с.
7. Робототехнічні системи: проектування і моделювання /М. М. Поліщук, М.М. Ткач; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ 2021. 112 с.
8. Polishchuk M. Anthropomorphic gripping device for an industrial robot: design and calculation of parameters // SN Applied Sciences. – 2019. – Vol. 1(503). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0535-z>
9. Adachi K., Koga S., Yamada Y. Grasp safety evaluation method for soft material by using soft finger filled with viscoelastic liquid // Journal of Robotics and

Mechatronics. – 2023. – Vol. 35(1). – pp. 198–206.

10. Patel, V. V., Morgan, A. S., & Dollar, A. M. (2020, October). Highly underactuated radial gripper for automated planar grasping and part fixturing. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 9910-9916). IEEE.

11. Guan, J., Su, Y., Su, L., Sivaparthipan, C. B., & Muthu, B. (2021). Bio-inspired algorithms for industrial robot control using deep learning methods. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101473.

12. Adachi, R., Fujihira, Y., & Watanabe, T. (2015, September). Identification of danger state for grasping delicate tofu with fingertips containing viscoelastic fluid. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 497-503). IEEE.

13. Majidi, C. (2019). Soft-matter engineering for soft robotics. *Advanced Materials Technologies*, 4(2), 1800477.

14. Walker, J., Zidek, T., Harbel, C., Yoon, S., Strickland, F. S., Kumar, S., & Shin, M. (2020, January). Soft robotics: A review of recent developments of pneumatic soft actuators. In *Actuators* (Vol. 9, No. 1, p. 3). MDPI.

15. E. Torres-Jara, Sensitive manipulation. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology (2007). <http://hdl.handle.net/1721.1/36371>

16. Huang, M. B., & Huang, H. P. (2019). Innovative human-like dual robotic hand mechatronic design and its chess-playing experiment. *IEEE Access*, 7, 7872-7888.

17. Zhang, Y., & Lu, M. (2020). A review of recent advancements in soft and flexible robots for medical applications. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 16(3), e2096.

18. Nivedha, A. K. (2024). Automated rfid-based patient health monitoring and remote data transmission with telegram integration. *Emerging Innovative Research in Science and Technology*.

19. Alhinqari, A., & Alhengari, A. (2021, May). Simulation of stepper motor motion and control. In *2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the*

*Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA* (pp. 573-578). IEEE.

20. Теорія автоматичного управління (збірник задач): навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева. Харків: ХНУРЕ, 2020. 240 с.

21. Latif, A., Widodo, H. A., Rahim, R., & Kunal, K. (2020). Implementation of line follower robot based microcontroller ATmega32A. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 1(3), 70-74.

22. Конспект лекцій з дисципліни «Комп'ютерні системи інженерної графіки та 3D-моделювання» для здобувачів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка освітніх програм: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», «Системна інженерія» / [Електронний ресурс] Упоряд.: Н.П. Демська. Електронне видання. Харків: ХНУРЕ, 2024. 240 с.

23. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Безпека праці в індустрії ІТ-технологій» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [<http://catalogue.nure.ua/knmz>] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 122 с.