

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

«На правах рукопису»

УДК 681.586.4:678.5:621.865.8

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«___» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

на тему: «Роботизований маніпулятор з гнучким захватом на основі силіконового композитного матеріалу»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ПК-41мп

Свищ Ольга Ігорівна _____

Керівник:

доцент

Богдан Галина Анатоліївна _____

Консультант з розробка стартап-проектів:

Завідувач кафедри економічної кібернетики,

Доктор економічних наук, професор

Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Свищ Ольга Ігорівна

1. Тема дисертації «Роботизований маніпулятор з гнучким захватом на основі силіконового композитного матеріалу», науковий керівник дисертації Богдан Галина Анатоліївна, доцент, затверджені наказом по університету від «04» листопада 2015 р. №4793-с.
2. Термін подання студентом проєкту 10.12.2025.
3. Об'єкт дослідження : процес роботизованого маніпулювання об'єктами за допомогою маніпулятора з гнучким силіконовим захватом.
4. Вихідні дані : адаптивний гнучкий модуль захвату типу Fin-Ray з системою контролю зусилля на основі FSR-датчиків для роботи в складі роботизованого маніпулятора.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: виконати комплекс робіт, пов'язаних із дослідженням та розробленням адаптивного гнучкого модуля захвату типу Fin-Ray для роботизованого маніпулятора. Провести огляд сучасних рішень у галузі м'якої робототехніки, сформулювати вимоги до маніпулятора й силіконового модуля, розробити геометричну модель захвату та варіанти композитного армування, обґрунтувати вибір матеріалів і кінематичної структури маніпулятора. Спроектувати привід і систему керування: виконати вибір сервомотора, мікроконтролера та датчика сили, розробити принципову схему і друковану плату в середовищі Altium Designer, написати програмний код, а також виготовити експериментальні зразки захвату, провести їх випробування та порівняти результати з даними моделювання.

6.Орієнтований перелік графічного ілюстративного матеріалу:

7. Орієнтований перелік публікацій:

Свищ О. І. «М'ЯКІ РОБОТИЗОВАНІ ЗАХВАТИ FIN-RAY НА ОСНОВІ
СИЛІКОНОВИХ КОМПОЗИТИВ ДЛЯ КОЛАБОРАТИВНОЇ» XXI Науково-
практична конференція «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у
приладобудуванні».

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розробка стартап- проектів	Завідувач кафедри економічної кібернетики, Доктор економічних наук, професор Бояринова Катерина Олександрівна		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	06.09.2025	
2	Проведення аналітичного огляду	16.09.2025	
3	Розрахунок параметрів захвату й маніпулятора	03.10.2025	
4	Підбір матеріалів і компонентів	15.10.2025	
5	Розробка 3D-моделей і схем	06.11.2025	
6	Проведення експериментів	20.11.2025	
7	Розробка стартап-проєкту	25.11.2025	
8	Здача диплому на перевірку керівнику	30.11.2025	

Студент

Ольга СВИЩ

Керівник

Галина БОГДАН

Анотація

Сучасна робототехніка дедалі частіше працює в режимі безпечної взаємодії з людиною та крихкими об'єктами, де традиційні жорсткі захвати вже не забезпечують потрібної відповідності форми, рівномірного розподілу зусиль та достатньої безпеки. Біоміметичні гнучкі захвати типу Fin-Ray на силіконовій основі дають змогу адаптивно охоплювати об'єкт без його пошкодження, проте для їх практичного впровадження бракує відпрацьованих рішень щодо вибору матеріалів, схем армування, інтеграції сенсорів сили та узгодження з параметрами промислових маніпуляторів. Актуальним є комплексне дослідження, яке поєднує конструктивно-матеріалознавчий підхід до проєктування м'якого захвату з аналізом можливостей його застосування як окремого модульного продукту та і в поєднанні з існуючими рішеннями.

Мета і задачі дослідження

Мета дослідження полягає у розробленні та обґрунтуванні роботизованого маніпулятора з гнучким захватом на основі силіконового композитного матеріалу, здатного адаптивно взаємодіяти з об'єктами маніпулювання та забезпечувати контроль зусилля захоплення.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі **основні задачі**:

1. Виконати огляд сучасних рішень у галузі м'якої робототехніки та гнучких захватів, сформулювати вимоги до маніпулятора і силіконового модуля;
2. Розробити геометричну модель гнучкого Fin-Ray захвату та його варіантів з різними схемами композитного армування;
3. Обґрунтувати вибір силіконового композиту та матеріалів армування, дослідити вплив їх розташування на деформаційні властивості захвату;

4. Вибрати і описати кінематичну структуру роботизованого маніпулятора, що забезпечує необхідну робочу зону та умови роботи гнучкого захвату;

5. Спроектувати привід захвату, виконати вибір сервомотора і мікроконтролера з урахуванням вимог до габаритів, крутного моменту та енергоспоживання;

6. Розробити принципову схему та друковану плату для тестового зразка системи керування гнучким захватом у середовищі Altium Designer, визначити схему підключення датчика тиску і сервоприводу та написати код для перевірки працездатності системи;

7. Обґрунтувати вибір датчика тиску, визначити його розміщення у конструкції пальця та алгоритм обмеження критичного зусилля;

8. Виготовити експериментальні зразки силіконового захвату методом лиття в 3D-друковані форми, провести їх експериментальні випробування та порівняти з результатами моделювання.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес роботизованого маніпулювання об'єктами за допомогою маніпулятора з гнучким силіконовим захватом.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є конструкція та параметри роботи роботизованого маніпулятора з гнучким захватом на основі силіконового композитного матеріалу, включно з геометрією захвату, схемою армування, системою приводу та вимірювання зусилля.

Методи дослідження

У роботі застосовано методи аналізу та узагальнення літературних джерел з м'якої робототехніки, методи тривимірного комп'ютерного моделювання і конструкторського проєктування, кінцево-елементний аналіз напружено-деформованого стану силіконових структур, експериментальні випробування

зразків захвату, а також методи обробки та інтерпретації експериментальних даних.

Ключові слова:

роботизований маніпулятор, гнучкий захват, силіконовий композитний матеріал, Fin-Ray захват, композитне армування, SolidWorks, датчик тиску, м'яка робототехніка.

Annotation

Modern robotics increasingly operates in modes of safe interaction with humans and fragile objects, where traditional rigid grippers no longer ensure the required shape conformity, uniform force distribution and sufficient safety. Biomimetic flexible Fin-Ray grippers based on silicone materials make it possible to adaptively envelop an object without damaging it, but their practical implementation still lacks well-established solutions regarding the choice of materials, reinforcement schemes, integration of force sensors and matching with the parameters of industrial manipulators. A comprehensive study is therefore relevant, one that combines a structural and materials-science based approach to the design of a soft gripper with an analysis of its potential application both as an independent modular product and in combination with existing robotic solutions.

Aim and objectives of the research

The aim of the research is to develop and substantiate a robotic manipulator with a flexible gripper based on a silicone composite material that is capable of adaptive interaction with handled objects and provides control of gripping force.

To achieve this aim, the following main tasks are addressed:

1. to review current solutions in the field of soft robotics and flexible grippers and to formulate requirements for the manipulator and the silicone module;
2. to develop a geometric model of a flexible Fin-Ray gripper and its variants with different composite reinforcement schemes;
3. to justify the choice of silicone composite and reinforcement materials and to investigate the influence of their arrangement on the deformation characteristics of the gripper;
4. to select and describe the kinematic structure of the robotic manipulator that provides the required workspace and operating conditions for the flexible gripper;

5. to design the gripper drive and select a servomotor and microcontroller taking into account the requirements for overall dimensions, torque and power consumption;

6. to develop the circuit diagram and printed circuit board for a test prototype of the control system for the flexible gripper in Altium Designer, to define the connection scheme for the force sensor and the servomotor and to write the code for verifying system operability;

7. to substantiate the choice of the force sensor, to determine its placement in the finger structure and the algorithm for limiting critical gripping force;

8. to manufacture experimental specimens of the silicone gripper by casting into 3D printed molds, to conduct experimental tests and to compare the results with simulation data.

Object of the research

The object of the research is the process of robotic manipulation of objects using a manipulator with a flexible silicone gripper.

Subject of the research

The subject of the research is the design and operating parameters of a robotic manipulator with a flexible gripper based on a silicone composite material, including gripper geometry, reinforcement scheme, drive system and force measurement system.

Research methods

The study uses methods of analysis and synthesis of literature sources on soft robotics, methods of three dimensional computer modeling and engineering design, finite element analysis of the stress and strain state of silicone structures, experimental testing of gripper specimens, as well as methods of processing and interpretation of experimental data.

Keywords:

robotic manipulator, flexible gripper, silicone composite material, Fin-Ray gripper, composite reinforcement, SolidWorks, force sensor, soft robotics.

Зміст

Анотація	1
Annotation.....	4
Зміст.....	6
Вступ	8
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА СУЧАСНИХ РІШЕНЬ	11
1.1 HRI. Взаємодія робота та людини.....	11
1.2 М'які роботи та гнучкі маніпулятори: історія та сучасний стан.	12
1.3 Класифікація гнучких захватів.....	15
1.3.1 Пневматичні гнучкі захвати	16
1.3.2 Силіконові захвати як матеріальний клас	18
1.3.3 Композитні матеріали та їх можливе	18
1.3.4 Застосування композитних матеріалів в м'яких захватах.....	22
1.4 Функції маніпулятора у складі системи з гнучким захватом.....	26
1.5. Вимоги до точності, жорсткості та вантажопідйомності та інтеграції.	27
Висновки та постановка завдання.....	29
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРОЕКТУВАННЯ.....	30
2.1 Опис стандартної схеми захвату Fin-Ray	30
2.2 Вибір силікону як матриці	32
Висновок до розділу	42
3.МЕХАНІКА. ГВИНТОВА ЗУБЧАСТА ПЕРЕДАЧА	43
3.1 Вибір двигуна.....	47
3.2 Вибір датчика тиску	49
3.3 Вибір мікроконтролера	52
3.4 Розробка електроніки	55
Висновок	57
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	58
4.1 Лиття силіконового захвату в форму.....	58
5.АНАЛІЗ ТА ВИБІР КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ МАНІПУЛЯТОРА	66

5.1. Порівняння типових кінематичних структур	66
5.2. Обґрунтування вибору структури.....	69
5.3. Опис обраної кінематичної схеми та робоча зона.....	70
Висновок до розділу	72
6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ “АДАПТИВНИЙ ГНУЧКИЙ МОДУЛЬ ЗАХВТУ”	73
6.1. Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту	73
6.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	76
6.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту ...	85
6.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності	100
Висновки.....	104
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	106
Список використаної літератури.....	108

ВСТУП

З постійним розвитком технологій промислової автоматизації, трудомісткі підприємства наголошують на використанні автоматизованого обладнання для заміни ручної праці. А зростаюча потреба в маніпуляторах, здатних обережно поводитися з делікатними об'єктами та безпечно співіснувати з людьми, висунула м'які роботи на перший план як практичне та економічно ефективне рішення.

М'які роботи характеризуються тим, що виготовлені з еластичних і м'яких матеріалів з майже нескінченною кількістю ступенів свободи та високим ступенем гнучкості. Порівняно зі своїми жорсткими аналогами, м'які роботи мають чудову здатність імітувати рух живих організмів та ділити безпечно середовище з людьми, що відповідає концепції взаємодії людини та робота. М'які захвати мають широку класифікацію та вже використовуються в найрізноманітніших сферах, таких як: медицина, харчова промисловість, виробництво електроніки і так далі [1].

Серед сучасних тенденцій у м'якій робототехніці особливу увагу привертають силіконові композитні матеріали, які поєднують у собі еластичність, довговічність, хімічну інертність і можливість зміни жорсткості шляхом введення наповнювачів або армувальних елементів. Завдяки цим властивостям вони ідеально підходять для створення адаптивних поверхонь та структур типу Fin Ray, які імітують природні принципи згинання біологічних тканин.

Проте досі не дивлячись на всі переваги м'яких захватів вони залишаються не поширеною практикою та існує розрив між теоретичним потенціалом та практичним застосуванням.

Актуальність

При переході виробництва від масового до високо варіативних малих серій деталей, що зумовлює потребу в універсальності інструментів, традиційні жорсткі захвати обмежують та спричиняють зупинки масштабування автоматизації. Для кожного типу виробу потрібні нові “пальці” (захвати) або змінні накладки, переналагодження займає ресурс (час), а ризик пошкодження крихких та чутливих до локальних напружень виробів (об’єктиви, скляна тара, кондитерські вироби, фармацевтичні блистери, електронні компоненти, біооб’єкти) зростає. Водночас зростає кількість використання сценарію, де людина безпосередньо взаємодіє або працює близько до роботизованої системи.

В українському контексті повномасштабна війна посилила виклики з якими стикаються виробництва, такі як обмежений імпорт спеціалізованої оснастки, дефіцит кваліфікованого персоналу, термінові зміни номенклатури виробництва та швидкий ремонт різноманітних накладок. Підприємствам потрібні рішення, які швидко переналагоджуються під нову номенклатуру, працюють у компактних і безпечних виробничих зонах та є універсальними.

Саме м’яка робототехніка відповідає цим викликам сьогодення через комплаєнс, адаптивне охоплення та здатність рівномірно розподіляти тиск на поверхні захвату.

Серед м’яких технологій саме силіконові композитні матеріали поєднують ключові властивості: біо- та хімічну інертність, можливість тонкого налаштування жорсткості та пружності, сумісність з харчовими й медичними вимогами, а також технологічність виготовлення. Композитна технологія виготовлення відкриває можливості для розвитку розумних м’яких захватів, що забезпечують м’який та надійний контакт.

М’які захвати можуть бути застосовані в безлічі напрямках:

- Харчова та пакувальна індустрія. Робота з тендітним пакуванням та крихкими продуктами: зефір, печиво;

- Фармацевтика. Робота з ампулами, лабораторним посудом та реагентами, також робота в чистих зонах;
- Чуттєва електроніка. Робота з крихкими датчиками, компасами, оптикою, чуттєві плати
- Агро-переробка. Робота з плодами, сортування, пакування

Також однією з великих переваг м'яких захватів є їх довговічність і стабільність характеристик у виробничих середовищах: циклічні згинально-розтягувальні навантаження, абразивний знос, контакт із мастилами та дезінфектантами, запиленість, температурні коливання, інтермітуюче енергоживлення та часті старт-стоп режими [1-3].

Додаткової актуальності додає інтеграція датчика сили безпосередньо в тіло силіконового композитного захвату. Одне лише пасивне згинання не гарантує відтворюваності процесів: для керованого делікатного контакту потрібен зворотний зв'язок за силою. Інтегрований датчик сили дає можливість обмежувати контактні навантаження, своєчасно виявляти початок ковзання та мінімізувати «перетискання» — отже, знижувати брак, енерговитрати й знос матеріалу.

Водночас не дивлячись на всі переваги м'яких захватів вони досі залишаються не поширеною практикою та існує розрив між теоретичним потенціалом та практичним застосуванням.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА СУЧАСНИХ РІШЕНЬ

1.1 HRI. Взаємодія робота та людини

Промислові маніпулятори тривалий час працювали в ізольованих зонах, оскільки їхні швидкості, жорсткі механізми та великі зусилля створювали ризики для персоналу. З часом з'явилася потреба в принципі розробки роботів, як одиницю, що буде інтегрована в одне середовище з людиною. При цьому взаємодія має бути безпечною, передбачуваною, ефективною та зручною для користувача. Поява колаборативних рішень стала відповіддю на запит виробництва до гнучких технологічних ліній, де налаштування, переналагодження та дрібносерійне збирання відбуваються швидко, а робітник зберігає контроль над процесом [5].



Рисунок 1.1 - Колаборативний маніпулятор UR5e

Приклади, де може бути успішно застосований колаборативна роботизована система: пакування і комплектування, тестування зразків, дозування, ручне калібрування елементів, контроль якості, сервіси з обслуговуванням лабораторного обладнання. У цих випадках підвищується роль безпечної взаємодії людина–робот, а на перший план виходить кінцева ефекторна частина, що безпосередньо торкається виробу.

На приклад, на деяких виробничих лініях Toolcraft використовуються колаборативні роботи UR5e [14, 21]. UR5e є колаборативним маніпулятором компанії Universal Robots A/S з Данії та має вантажопідйомність 5 кг. Цей маніпулятор застосовується для обслуговування верстатів, комплектування, пакування, дозування та гвинтових операцій. З даних самої компанії Toolcraft після впровадження колаборативного роботу виробництво додало +43% до пропускної спроможності та досягло зниження витрат на 23%.

1.2 М'які роботи та гнучкі маніпулятори: історія та сучасний стан.

Якщо розглядати історію гнучких захватів то, початок активного розвитку м'якої робототехніки пов'язують із переходом від суто жорстких конструкцій до еластомерних структур, здатних деформуватися й безпечно контактувати з оточенням. Одними з перших, хто систематизував підхід до м'яких захватів та зробив детальний опис їх використання були Даніела Рус та Майкл Т. Толлі в оглядовій статті “Проектування, виготовлення та керування м'якими роботами”.

Ранні демонстрації та експерименти показали, що еластичні мережі каналів у силіконі забезпечують великі кути згину й «обгортання» об'єкта без складної механіки. Саме цей підхід став базою для багатьох пальців і маніпуляторів, що працюють від пневмоприводу.

Біоміметичні концепції привели до рішень на кшталт FlexShapeGripper від Festo, де силіконова «шапка» наслідує принцип язика хамелеона й охоплює кілька дрібних предметів за один цикл. Для робіт із різномірними формами це зручний шлях зменшити кількість змінних насадок.

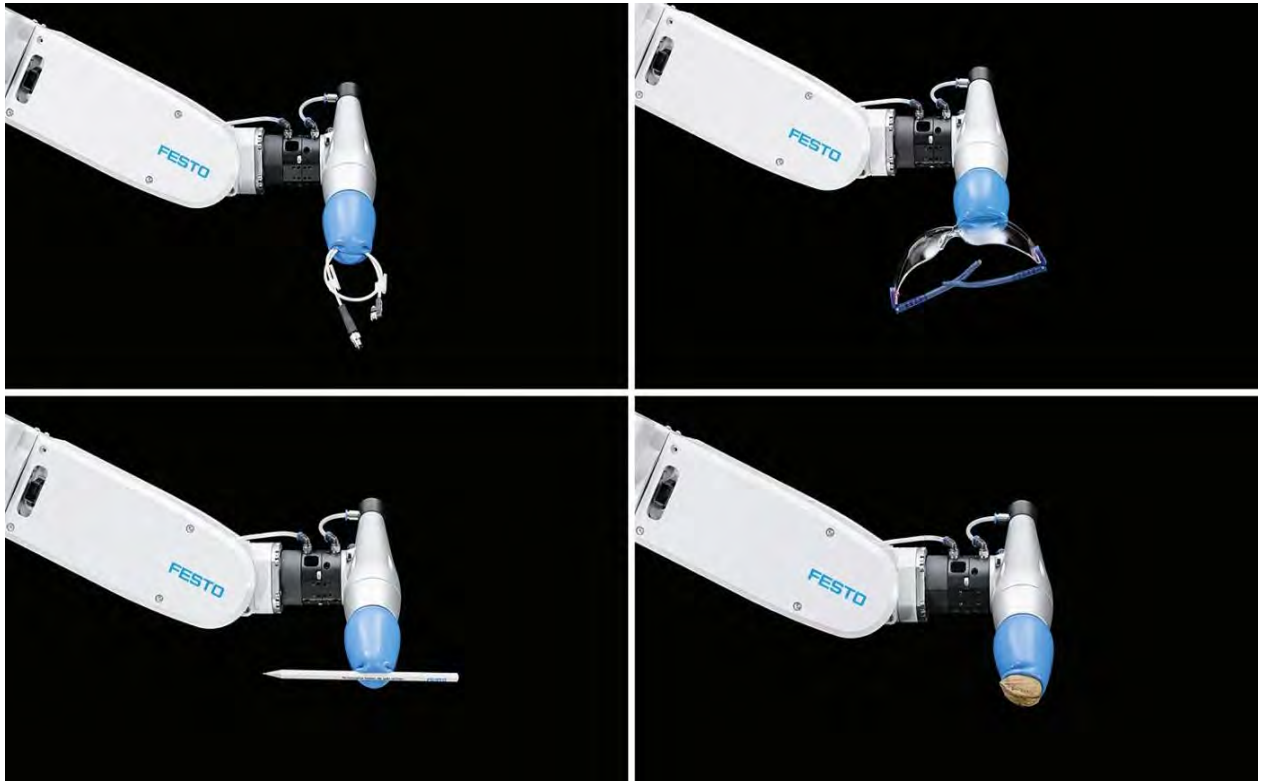


Рисунок 1.2. - М'який захват FlexShapeGripper від Festo

Інший трек — пальці за ефектом Fin Ray. Тут ребриста структура зігнутої «плавникової балки» пасивно підлаштовується під контур виробу та стабілізує контакт. Адаптивні пальці Festo DHAS демонструють цей принцип у промисловій фурнітурі з діаметрами виробів від одиниць до десятків міліметрів [13].



Рисунок 1.3. - Адаптивні пальці Festo DHAS

Застосування виходять далеко за межі маніпулювання деталями. М'які роботизовані рукавички для реабілітації кисті використовують пневмокамери або тканинно-композитні приводи, забезпечуючи безпечну допомогу пацієнтам із спастикою та обмеженим згинанням пальців. Такі системи показують, як піддатливість матеріалу знижує ризики ушкоджень у фізичному контакті.



Рисунок 1.4. - Робота м'яких роботизованих рукавичок

Наразі колаборативні маніпулятори та м'які захвати ще не стали повсюдною рутинною, проте їх застосування впевнено зростає у малих і

середніх виробництвах харчової, електронної та металообробної галузей, а також у логістиці й лабораторних сервісах. Для таких майданчиків вирішальними є швидке переналагодження, робота з короткими серіями, безпечна співпраця в спільному просторі оператора і машини, тому саме колаборативні маніпулятори беруть на себе комплектування, пакування, обслуговування верстатів, контроль якості та дозування з помірними швидкостями й обмеженням сили у контакті. Географічний розподіл інсталяцій промислових роботів пояснює різницю у темпах впровадження: на 2023 рік основний приріст припадає на Азію, де зосереджено більшість нових систем, у Європі та Північній Америці попит підтримують кластери дрібносерійного виробництва і логістики з широкою номенклатурою. В межах задач делікатного хапання сформувався окремий клас м'яких ефекторів на основі силіконових еластомерів і композитів, які пасивно підлаштовуються під нестандартні форми, рівномірно розподіляють тиск і забезпечують стабільне утримання тонкостінної тари та харчових продуктів без постійної заміни накладок. У підсумку вимоги гнучких ліній, пошук безпечного контакту з виробом і прагнення зменшити час переналагодження поступово зміщують оснастку у бік м'яких рішень, а колаборативні маніпулятори закріплюються як інструмент щоденних операцій там, де традиційні жорсткі пальці давали підвищений ризик пошкоджень або вимагали тривалих налаштувань під кожен артикул.

1.3 Класифікація гнучких захватів

Загалом у літературі наразі немає єдиного узгодженого стандарту, тож м'які захвати ділять одразу за кількома осями. Найперше — за тим, як виникає утримувальна сила, тобто: геометричне охоплення або щипковий контакт, тертя, коли притиск мінімальний а тримання забезпечується коефіцієнтом

тертя, адгезія, і зрідка підходи з мікрогачками чи голками, що майже не застосовуються у делікатних задачах [13].

Ще одна категорія джерело енергії й тип актуатора, сюди відносять пневмо- та гідроприводи в еластомерних камерах, тросові або «сухожилкові» схеми, електроактивні полімери на кшталт DEAs чи IPMC, матеріали з пам'яттю форми, магніточутливі. Також розрізняють типом деформації: активна деформація, регульована адгезія, монолітні еластомерні пальці, тканинні пневмоактуатори, орігаміта кірігамі-структури, Fin-Ray та чашкові захвати [2, 9].

Розглянемо деякі захвати детальніше.

1.3.1 Пневматичні гнучкі захвати

Пневматичні «м'які пальці» містять внутрішні камери; при подачі позитивного тиску вони керовано згинаються або видовжуються за рахунок заданої геометрії стінок або каналів і різної товщини оболонки. Сьогодні це — наймасовіший клас актуації серед «м'яких» захватів, особливо у системах, що фіксують об'єкт геометрично, де пальці або з'єднані з механізмом, або виконані як моноблок із інтегрованими камерами [7].



Рисунок 1.5. - Приклад пневматичного гнучкого захвату

Пневматичні гнучкі захвати вирізняються адаптивним захопленням без складної кінематики, можливістю лінійно масштабувати силу хвата через регулювання тиску та безпечністю взаємодії з крихкими чи біологічними об'єктами. Водночас їхні обмеження пов'язані з потребою у джерелі стисненого повітря або вакууму та магістралях, ризиками витоків і вимогами до герметичності й калібрування динаміки, а також одним в мінусів є ускладнене точне позиціонування без інтегрованої сенсорики. Проте унікальність цього класу полягає в поєднанні простої, технологічної структури з дуже широким діапазоном хватальних сценаріїв.

У стандартному техпроцесі виготовлення такі пальці проектують у CAD із заданими товщинами стінок і каналів, виготовляють роз'ємні форми на 3D-принтері, здійснюють дегазацію й лиття силікону, а потім вводять волоконні пояси чи текстильні вставки, які задають напрям і межі згину. На завершення інтегрують штуцери, клапани та датчики тиску [13, 15]. На рис. 1.6 зображено процес лиття м'якого захвати пневматичного типу.

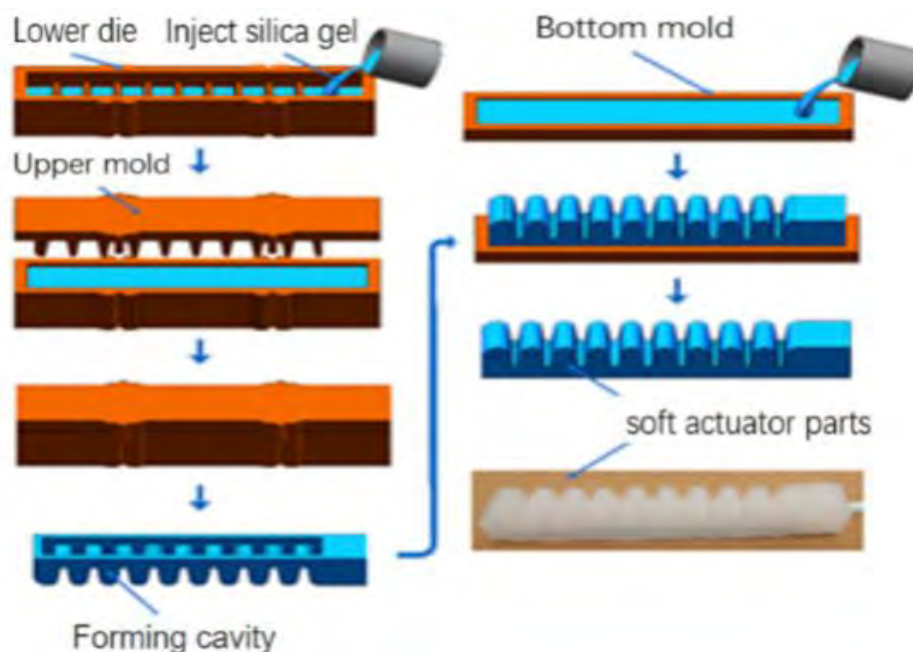


Рисунок 1.6. - Схема процесу формування ливарних м'яких захватів

1.3.2 Силіконові захвати як матеріальний клас

Силіконові еластомери: PDMS, Ecoflex тощо часто становлять «тіло» більшості м'яких пальців через високе подовження до розриву, еластичність і біосумісність (наприклад Ecoflex 00-30 це надм'який силікон з твердістю ~Shore 00-30, типовим модулем на 100% деформації близько 10 psi і подовженням до розриву $\approx 900\%$; тимчасова міцність орієнтовно 200 psi $\approx 1,38$ МПа).

Проте «чистий» силікон чутливий до зсувних навантажень та концентрацій напружень на швах; у силових режимах вимагає або зовнішніх ригілів (наприклад друковані кожухи TPU або PA12), або тканинного армування.

Для інженера критичною є ще одна риса: можливість інтегрувати сенсори в силікон без переходу до жорстких вставок. Разом із сенсорикою силікон добре поєднується з адитивно виготовленими зовнішніми елементами — наприклад, TPU-кожухами або PA12-ребрами, що локально підсилюють, обмежують небажані моди деформації й дозволяють тонко налаштовувати кривизну без перепроєктування еластомерної начинки [10, 5, 15].

У силових і ресурсних задачах це веде до композитної логіки — введення текстильних поясів, ниток або сіток у процесі лиття чи поверхневим нашаруванням, а також до застосування друкованих каркасів, що працюють як зовнішній «екзоскелет».

1.3.3 Композитні матеріали та їх можливе застосування

У найзагальнішому сенсі композит це макроскопічне поєднання двох або більше матеріалів із чіткою міжфазною границею, де один компонент виконує роль матриці тобто зв'язної фази, а інший має роль підсилення (волокна, частинки, тканини, шаруваті вставки), що надають системі нові або покращені властивості. При цьому компоненти не розчиняються один в одному і зберігають ідентичність у готовій структурі.

У технічних композитах визначальними є якість з'єднання між фазами та можливість свідомо формувати напрямну неоднаковість властивостей: орієнтація й об'ємна частка підсилення задають модуль пружності, міцність, демпфування, теплопровідність і навіть електропровідність у відповідних напрямках.

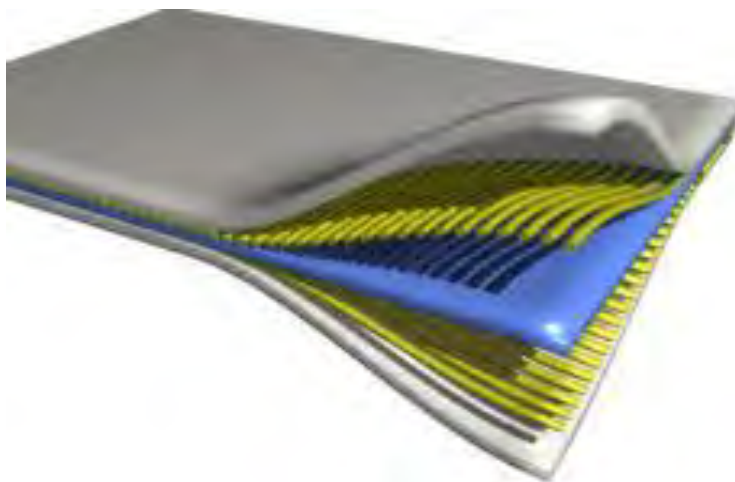


Рисунок 1.7. - Схематичне зображення простого композитного матеріалу

Розглянемо декілька варіантів композитів та домішок та яких властивостей ці домішки додають.

Є багато домішок які використовуються як, підсилювачі механіки, до них відносяться: кремнезем, волокна, різноманітні решітки. Дрібнодисперсний кремнезем SiO_2 утворює в силіконі наче мікро-скелет, що піднімає модуль і міцність на розрив, зменшує ризик розповзання тріщин у тонких перемичках. Короткі волокна такі як скловолокно та нейлон беруть на себе зсувні навантаження, стабілізуючи кривизну згину в пальці [11, 23]. Друковані решітки з TPU або PA12, накладені зовні, працюють як екзоскелет та скеровують деформацію, не відбираючи м'якості у контактній зоні. Проте є й мінуси такого застосування, наприклад при профіциті кремнезему падає

подовження до розриву, а неправильно покладена тканина дасть місцеві розшарування

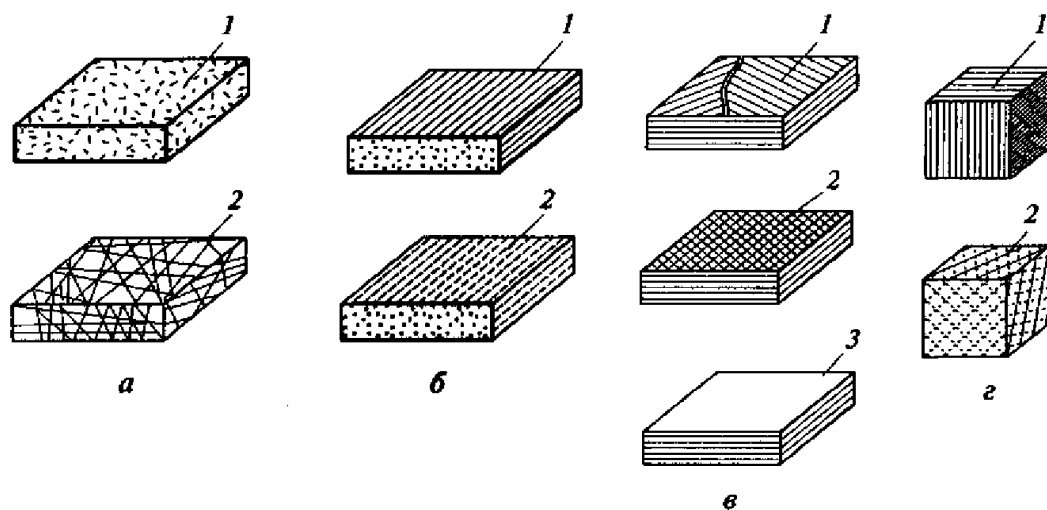


Рисунок 1.8. - Класифікація волокнистих композитів за конструктивною ознакою. а - хаотично армовані коротким (1) та безперервним (2) волокном; б - одновимірною армовані безперервним (1) і коротким (2) волокном; в - двовимірною армовані безперервними нитками (1, 2) та тканинами (3); г - просторово армовані трьома сімействами ниток (1) і сімействами ниток під 45 градусів (2)

Ще одним видом домішок в композитах, що можуть нас цікавити це провідні наповнювачі для сенсорики: сажа, CNT та графен, срібні пластивці. Вони додають провідні стежки усередині м'якого тіла, які змінюють опір при деформації а отже так отримують розтяжні датчики тиску й вигину. Тобто таким чином в композит додається гнучкий сенсор що може відчувати, де і як натискає палець та легко робити карти тиску або детекцію ковзання. З мінусів виділяють густішу суміш, гіршу розтяжність.

Також розглянемо теплопровідні наповнювачі: Al_2O_3 , BN, AlN. Їх додаються з ціллю підвищити теплопровідність, тобто досягти рівномірної температури у швидкому циклі та зменшити перегрів від внутрішнього тертя.

Або додаючи до силікону карбонільне залізо або порошок NdFeB у магнітному полі зростає жорсткість або з'являється керована деформація. Ми отримуємо спосіб спосіб перемикає жорсткість без повітряних каналів. Проте

з цими домішками існують суттєві мінуси: Ускладнюється технологія (бажано орієнтувати частинки в полі під час отвердіння), з'являється ризик агрегації, корозійні, зменшується подовження [24].

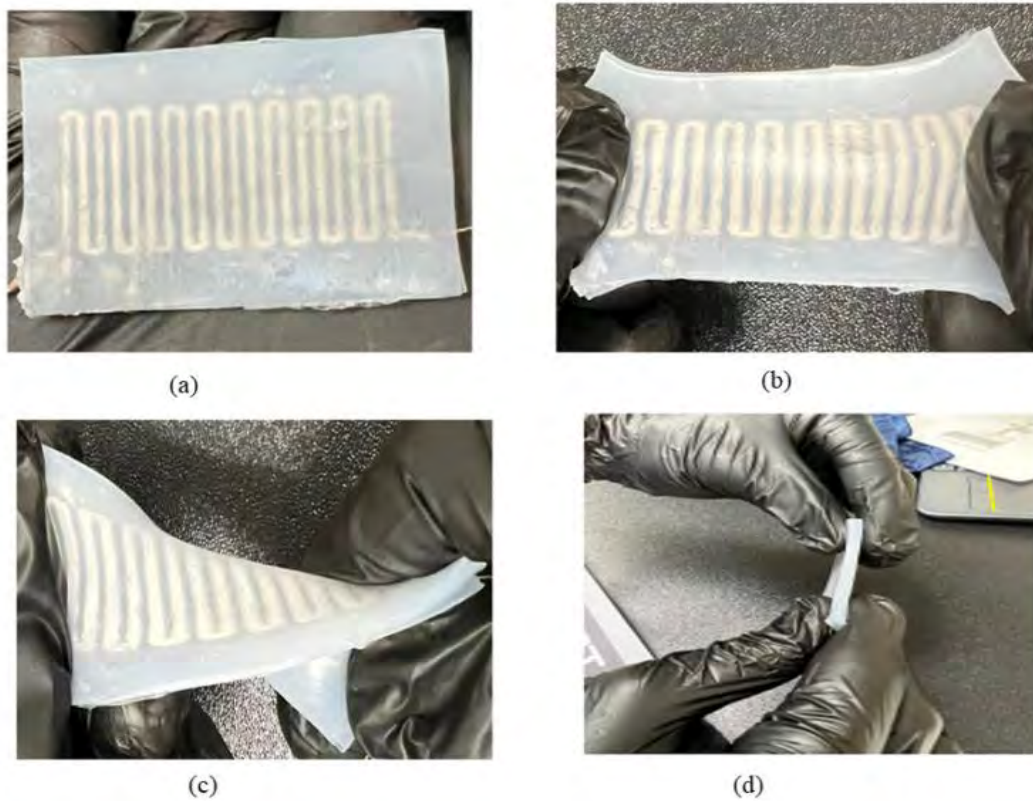


Рисунок 1.9. - Приклад композиту з провідними наповнювачами

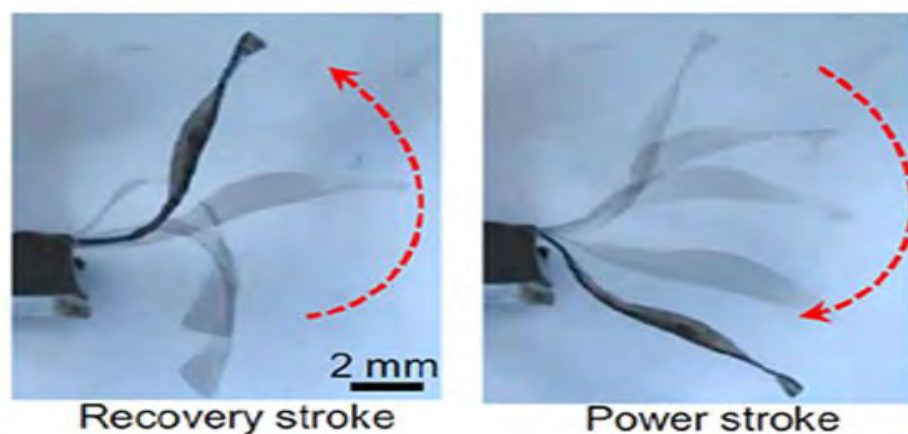


Рисунок 1.10. - Згинальний актуатор hME, керований за допомогою магнітного поля ([Lum et al., 2016](#))

1.3.4 Застосування композитних матеріалів в м'яких захватах

Отже, в попередньому розділі ми визначили проблему “чистого” еластомера: надзвичайна комплаєнтність, яка дарує делікатний контакт, водночас означає обмежену несучу здатність, нестабільну кривину під зсувами і прискорену втому. В цьому випадку композитна технологія є рішенням. Тому для вирішення подальших задач будемо використовувати композитні матеріали.

Для м'якої робототехніки базовою матрицею майже завжди слугують полімерні еластomers: PDMS, силіконові каучуки, TPU. Тоді як підсиленням виступають текстильні пояси та нитки, волокна, тонкі плівки, 3D-друковані решітки або функціональні частинки: металеві або вуглецеві провідні наповнювачі, магніточутливі мікрочастинки. Загалом саме поєднання «м'якої» матриці з правильно підібраним підсиленням дозволяє отримати конструкції, здатні одночасно обіймати крихкі предмети й протистояти зсувам, циклічним навантаженням та зношуванню — тобто виконувати роботу промислового захвата без втрати безпечності контакту [4].

Наразі композитну технологію в м'яких захватах зараз використовуються найчастіше в трьох напрямках: волокнисто-армовані еластомерні оболонки, структурні композити геометрії (наприклад Fin-Ray) і функціональні композити зі змінною жорсткістю або сенсорикою. Розглянемо кожен з типів.

Волокнисто-армовані еластомерні оболонки - це пневматичні еластомерні «трубки» з намотаними під заданим кутом волокнами або нитками, де еластомер слугує матрицею, а волокна підсиленням, що геометрично забороняє небажані деформації та дозволяє потрібні. Такий актуатор при накачуванні може видовжуватись, скорочуватись, згинатися чи скручуватись залежно від кута намотки та геометрії, утворюючи керовану анізотропію; по

суті, це класичний композит для м'якої робототехніки, у якому механіка захвата налаштовується розміщенням підсилення.



Рисунок 1.11. - Приклад волокнисто-армованої еластомерної оболонки (ROBOMECH Journal)

Fin-Ray-пальці наслідують будову риб'ячого плавця: поперечні стінки, спираючись на «хребет», під навантаженням викликають реверсивний вигин у бік об'єкта, забезпечуючи пасивне «обгортання» без насосів і клапанів. У сучасній інженерній практиці такі пальці друкують із TPU і піддають топологічній оптимізації, зменшуючи масу та підвищуючи запас міцності. При вмотуванні всередину силікону каркасу, міцність та направлений рух може зрости в декілька разів.

Наразі в аналізі готових продуктів на ринку, що позиціонують себе як м'які композитні захвати дуже мало. Оскільки більшість розробок та відкриттів в цьому напрямку були зроблені впродовж 2021 - 2025 років

Приклади існуючих силіконових композитних захватів: Piab piSOFTGRIP, електроадгезійні силіконові подушки Grabbit та силіконові чаші з підсиленням.

piSOFTGRIP — це вакуумно-керовані силіконові «пальці», з вмонтованими датчиками відлиті єдиною деталлю з детектованого силікону.



Рисунок 1.12. - Захват piSOFTGRIP

Електроадгезійні силіконові подушки Grabbit вже працюють на виробничих лініях Nike. Робоча подушка це багатошарова конструкція: силіконова діелектрична матриця зверху й знизу, всередині візерунок електродів (шар провідного силікону) електроди утворюють поле і притягують шаруваті деталі (текстиль, сітки, шкіру) без вакууму.

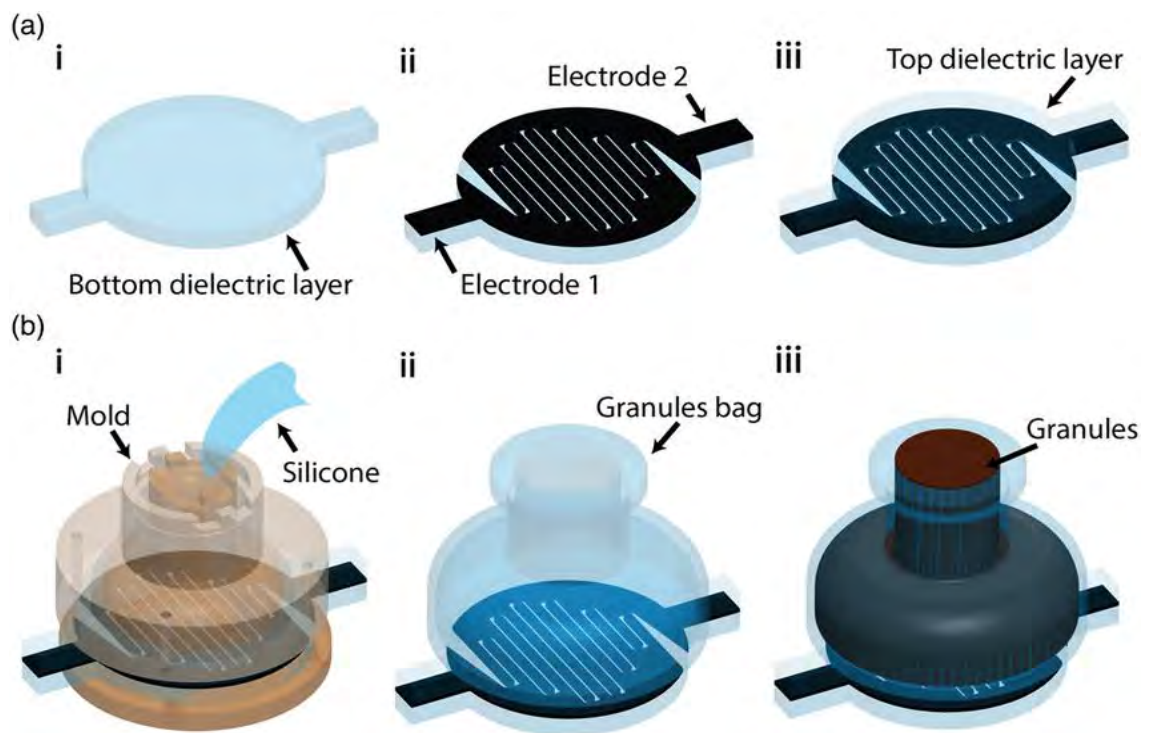


Рисунок 1.13. - Виготовлення захвату Grabit та його структура

У харчовому пакуванні та pick-and-place широко застосовують силіконові багатогофрові чаші, які можна комплектувати внутрішнім підсилювальним кільцем із поліаміду. Такий елемент працює як легкий скелет: стабілізує гофру при високих темпах, зменшує зминання та провали тонких пакетів, підвищує точність позиціювання [25].



Рисунок 1.14. - Силіконові багатогофрові чаші як приклад композитних захватів

1.4 Функції маніпулятора у складі системи з гнучким захватом

У системах, що включають м'який силіконовий захват типу Fin-Ray, маніпулятор виконує комплекс функцій, необхідних для реалізації точного, керованого та безпечного маніпулювання об'єктами різної геометрії. Основним завданням маніпулятора є забезпечення просторового переміщення гнучкого ефектора таким чином, щоб кінцевий контакт між захватом і об'єктом відбувався із мінімальною похибкою позиціонування. Маніпулятор має компенсувати пасивну змінність форми Fin-Ray-пальця, підтримувати правильну траєкторію підведення до об'єкта та гарантувати, що адаптивне «обгортання» виконується у межах прогнозованої механічної відповіді. Окрім функції переміщення, маніпулятор виконує функцію регулювання контактної взаємодії між захватом і об'єктом. У поєднанні з інтегрованим датчиком сили FSR-400, який розміщується у подушечці м'якого пальця, маніпулятор бере участь у формуванні контрольованого режиму дотику. Він забезпечує плавне зниження швидкості у зоні контакту, стабілізацію положення при досягненні порогової сили та можливість делікатного дозування зусилля захвату [13]. Такий підхід суттєво зменшує ризики пошкодження крихких об'єктів, що підтверджено сучасними дослідженнями у сфері HRI та м'якої робототехніки. При цьому маніпулятор виконує ще одну критичну функцію — утримання рівноваги системи: компенсацію мікроколивань, вібрацій та нерівномірного згинання Fin-Ray-структури. За рахунок цього забезпечується стабільність траєкторій навіть у момент деформації силіконової матриці.

Окремою функцією є інтеграційна. Маніпулятор виступає платформою для фізичного розміщення гнучкого захвату, сенсорики. Він забезпечує підведення живлення, передачу керуючих сигналів, синхронізацію руху привод.

1.5. Вимоги до точності, жорсткості та вантажопідйомності та інтеграції

Отже, в нашому випадку, вимоги до маніпулятора істотно відрізняються від вимог до традиційних жорстких промислових ефекторів. М'яка структура пальця компенсує частину похибок позиціонування, однак одночасно висуває підвищені вимоги до керованості руху, стабільності механіки та передбачуваності контактної взаємодії. Це підтверджується результатами експериментів, де продемонстровано, що Fin-Ray-структура компенсує до 25–40 % геометричної похибки за рахунок пасивного «обгортання» об'єкта. Тому у цьому підрозділі визначаємо декілька груп ключових вимог: точність, жорсткість, вантажопідйомність і інтеграція, безпечний режим HRC [21, 22].

- Точність.

Як ми визначили раніше, позиціонування та точні в м'яких роботизованих системах трохи компенсовується гнучкістю та адаптивність захватів. Для порівняння, стандартні колаборативні маніпулятори UR5e забезпечують повторюваність $\pm 0,03$ мм, що значно перевищує потреби м'якого захвата. Тобто, виходячи з цього можна сказати ми на відміну від багатьох інших сценаріїв використання маніпуляторів не залежимо від точності руху.

- Жорсткість

Жорсткість маніпулятора визначає здатність утримувати просторове положення захвата під дією зовнішніх сил, що особливо важливо для м'яких ефекторів, які самі по собі мають високу текучість. Літературні джерела показують, що недостатня жорсткість ланок маніпулятора призводить до зменшення ефективності сили стиску на 15–30 % (Sholl & Mohseni, 2024), оскільки частина сили «гаситься» у деформації самого маніпулятора.

У випадку Fin-Ray-пальця жорсткість ефектора буде доволі низька — середній силікон має модуль пружності $\approx 0,5\text{--}0,7$ МПа та подовження до 490 %. Це означає, що вся система повинна мати достатній запас жорсткості у

маніпуляторі й приводі, щоб не зміщуватись при реактивному навантаженні пальця.

Отже а цими вимогами нам підходять такі види роботів маніпуляторів Universal Robots UR3e, Doosan Robotics M0609, KUKA LBR iiwa 7 R800 та Franka Emika Panda. Маніпулятори UR3e та M0609 вирізняються високою повторюваністю (до $\pm 0,03$ мм) і розвинутими механізмами контролю сили, що дає змогу плавно підводити Fin-Ray-палець до об'єкта без ривків. Робот KUKA LBR iiwa 7 характеризується сенсорами моментів на всіх осях і точним імпедансним керуванням, яке особливо важливе під час роботи з еластомерними матеріалами, що деформуються під навантаженням. Franka Emika Panda, своєю чергою, забезпечує одну з найкращих у класі плавностей мікрорухів та надчутливий torque-control, тому є оптимальним варіантом для досліджень м'яких роботизованих систем.



Рисунок 1.15. - Зображення Franka Emika Panda

Висновки та постановка завдання

Отже, огляд літератури та сучасних рішень засвідчив, що м'яка робототехніка за останнє десятиліття перейшла з площини академічних прикладів у площину інженерних продуктів для виробництва, медицини та логістики. Це стало можливим завдяки поєднанню трьох взаємопов'язаних чинників, кожен з яких водночас дав відчутні переваги. По-перше, поява матеріальних платформ на основі силіконових еластомерів і їхніх композитів забезпечила саме ті властивості, яких бракувало жорстким системам: високе тертя чи контакті та делікатність взаємодії, а також біо- та хімічну інертність. По-друге, розвиток структурних принципів адаптивного охоплення а саме: пневмокамер, Fin-Ray, орігамі та кіргамі-структур, тканинно-армованих оболонок, що дало конструктивні засоби для надійного захоплення різномірних об'єктів без складної переналадки, підвищивши універсальність і продуктивність. По-третє, прогрес у моделюванні і в керуванні, завдяки сучасним CAD програмам, зробив поведінку таких систем передбачуваною та керованою, що підвищило відтворюваність, зменшило ризики пошкоджень і спростило інтеграцію у виробничі процеси.

Матеріалознавчий огляд підтвердив, що чистий силікон, попри високе подовження до розриву й стабільність, має вади для силових та ресурсних режимів: чутливість до зсуву, локальних концентрацій напружень та розкид повторюваності. Композитна технологія додає керованість, підвищує несучу здатність та довговічність. А додавання провідних наповнювачів відкриває шлях до інтегрованої сенсорики сили, тиску, вигину.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРОЕКТУВАННЯ

2.1 Опис стандартної схеми захвату Fin-Ray

Отже, захват типу Fin-Ray це пасивно-адаптивний палець, що згинається у бік прикладеної сили та обгортає об'єкт, вирівнюючи контактні тиски по поверхні.

Вибір саме цього типу захвату базується на кількох вагомих перевагах: палець сам підлаштовується під кривизну деталі без активного керування локальною кривиною, мінімум рухомих частин, легкість у виготовленні, толерантність до похибок позиціювання.

Класичний палець Fin-Ray складається з двох гнучких бокових лонжеронів, що сходяться у вершину й утворюють трикутний контур, між ними ряд поперечних косих ребер. Коли зовнішня сила прикладається з одного боку, діагоналі перерозподіляють навантаження так, що палець згинається у бік сили, обгортаючи деталь.

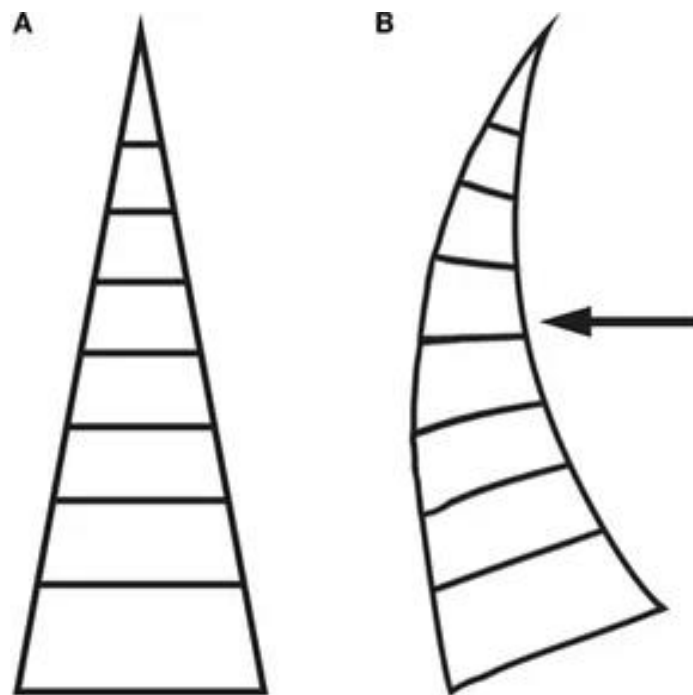


Рисунок 2.1. - Ефект Fin Ray. (А) Ненавантажена конструкція Fin Ray, (В) Навантажена конструкція

Для подальших теоретичних розрахунків буде використовуватись саме структура пальцю Fin-Ray.

Існують декілька загальних залежностей в моделюванні такого захвату, якими будемо керуватись в подальшому:

- Кут ребер θ (має бути $\approx 20\text{--}45^\circ$): чим більше, тим більше спрямованої жорсткості та краще проти кручення, але жорсткіший контакт. Якщо кут менше, то м'якший обхват, більша чутливість до скручування.
- Крок і товщина ребер: чим менший крок і товстіші ребра, тим стабільніша форма та менше впливе на циклах, але вищі пікові тиски.
- Кількість поперечних ребер у структурі типу Fin-Ray істотно впливає на механічну поведінку та функціональну ефективність гнучкого захвату. Зменшення їх кількості призводить до зростання комплаєнтності системи, тобто підвищення здатності до деформації під дією зовнішнього навантаження. Такі конструкції характеризуються більш вираженим ефектом «обгортання» об'єкта, що є перевагою при роботі з делікатними або нерегулярними за формою предметами, проте водночас вони демонструють нижчу несучу здатність і більші локальні напруження у зонах кріплення ребер. Навпаки, збільшення кількості ребер спричиняє рівномірніший розподіл навантаження вздовж профілю, зменшує амплітуду прогину та забезпечує стабільнішу траєкторію деформації, однак підвищує жорсткість пальця та знижує його здатність до адаптивного контакту з поверхнею.

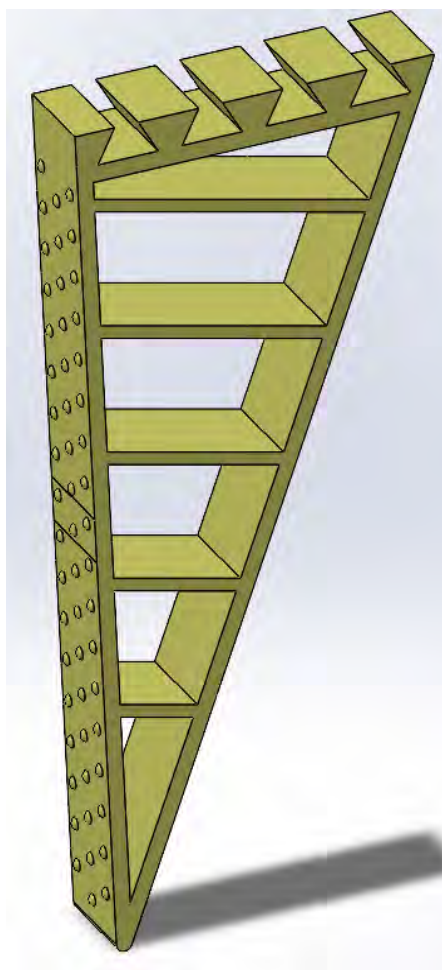


Рисунок 2.2. - Модель м'якого захвату Fin Ray, що буде використовуватись в перших симуляціях

Опис захвату: кут між двома гнучкими бокових лонжеронами вибраний 20 градусів. Товщина бокових лонжеронів 3,5 мм. Кількість ребер 9. Товщина ребер 2,5 мм при лонжеронах невеликі ділянки товщиною 1,5, що дозволяють підвищити м'якість конструкції.

2.2 Вибір силікону як матриці

Є декілька важливих критеріїв вибору матриці для Fin-Ray із делікатним контактом:

- Твердість і початкова жорсткість. Визначають мінімальну силу, потрібну для формоутворення, і рівень піків тиску.

- Подовження до розриву та розривна міцність. Відповідають за стійкість до концентраторів напружень у зоні ребер.
- Стійкість до циклування, втоми. Впливають на повторюваність сили захвату й повернення у форму.
- Адгезія до тканини та вкладишів. Оскільки є критичною для композиту, щоб уникнути деламінації.
- Технологічність. В'язкість до заливки, час життя суміші, безпечність, стабільність властивостей.

Отже виберемо декілька силіконів та зробимо порівняльну таблицю з ними по цих критеріях. Порівнювальні силікони: Smooth-On Ecoflex, Smooth-On Dragon Skin 10 Medium, Smooth-On Mold Star 16 FAST, WACKER ELASTOSIL M 4601 A/B, DOW SYLGARD 184.

Таблиця 2.1 - Порівняння силіконів

Силікон	Твердість по Шору	Подовження	Час затвердіння при кімнатній температурі
Ecoflex 00-30	00-30	~900%	~ 4 год
Dragon Skin 10 Medium	A10	~1000%	~ 5 год
Mold Star 16 Fast	A16	~440 %	~30 хв
WACKER ELASTOSIL M4601 A/B	A28	~700%	~12 год
DOW SYLGARD 184	A43	~140 %	~48 год
SKL-20 Platinum Silicone	A20	~400 %	~5 год

Тепер маючи перелік характеристик матеріалу, додамо ці матеріали в матеріальну базу соліду та спробуємо провести симуляції навантаження для вибору найкращого силікону під наші потреби.

Для всіх симуляцій будуть застосовуватись однакові умови навантаження та одне місце прикладання сили. Сила прикладена до невеликої площі дорівнює 0.1 Н.

- Ecoflex 00-30

При симуляції з даним матеріалом процес симуляції обірвався на 13 відсотках, що означає для нас незадовільний результат. Матеріал занадто еластичний. На фото зображено результати симуляції, що встигли обробитись при 13 відсотках та шкала деформації.

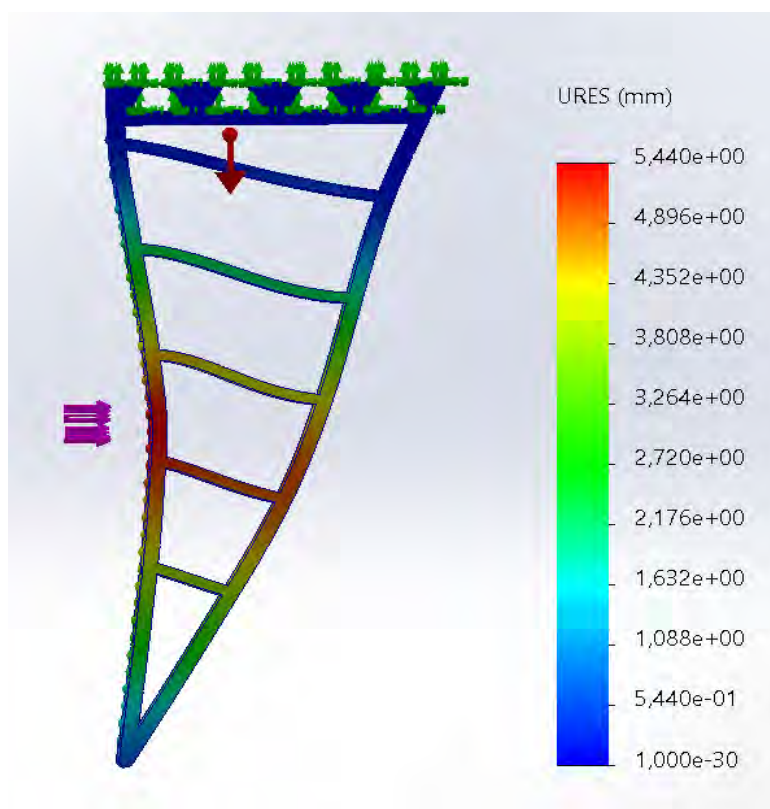


Рисунок 2.3. - Симуляція навантаження “пальцю” з матеріалу Ecoflex 00-30

- Dragon Skin 10 Medium

При симуляції з силіконом Dragon Skin 10 Medium результати також були незадовільні, процес симуляції обірвався при 46 відсотках, що краще ніж попередній результат проте результат показує все ще, що при такому навантаженні наш захват може не витримати та не втримати об’єкт.

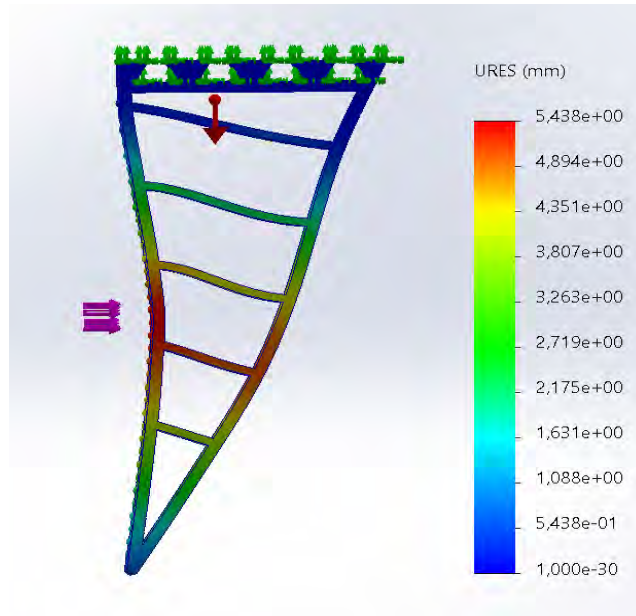


Рисунок 2.4. - Симуляція навантаження “пальцю” з матеріалу Dragon Skin 10 Medium

- Mold Star 16 Fast

При запуску симуляції в цьому випадку проблем не виникало. При навантаженні в 0.1 Н результати показані на фото, деформація в точці досягла 14.5 мм.

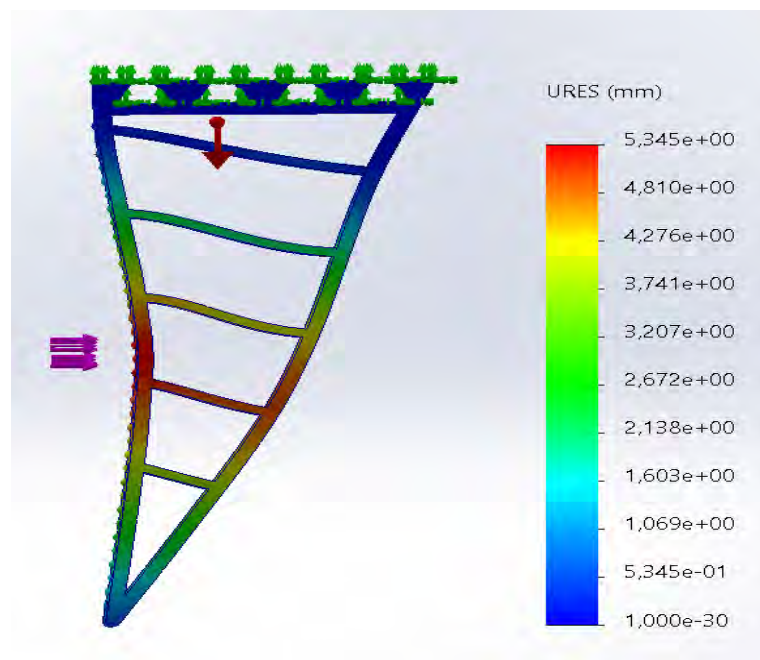


Рисунок 2.5. - Симуляція навантаження “пальцю” з матеріалу Dragon Skin 10 Medium

- WACKER ELASTOSIL M4601 A/B

При моделюванні з використанням WACKER ELASTOSIL M4601 результати були задовільними. При навантаженні 0.1 Н матеріал показав занадто велику жорсткість, тому навантаження збільшили до 0.4 Н.

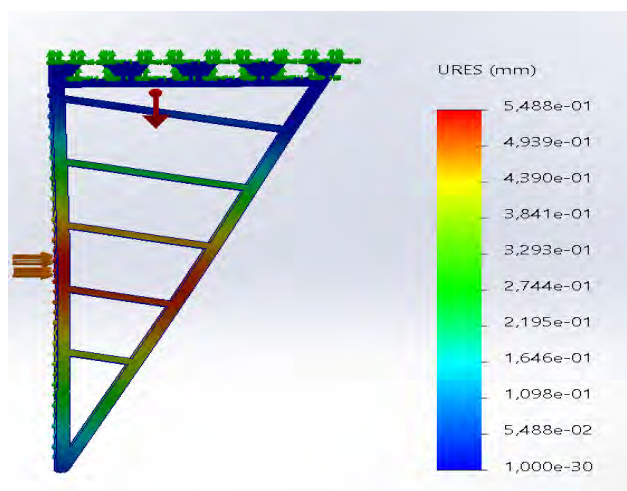


Рисунок 2.6. - Симуляція навантаження “пальцю” з матеріалу Dragon Skin 10 Medium

При підвищенні навантаження до 0.3 Н симуляція пройшла стабільно. Матеріал продемонстрував кращий розподіл деформацій, при такому навантаженні відхилення складо 12 мм в площі прикладення сили.

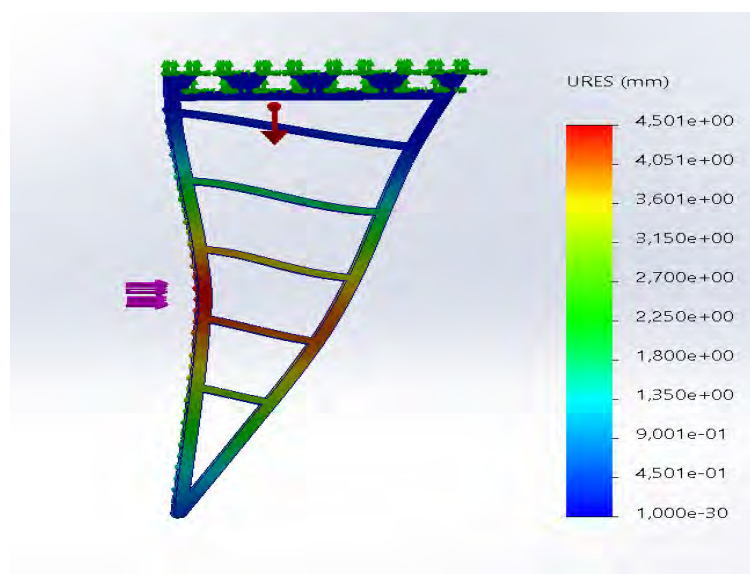


Рисунок 2.7. - Симуляція навантаження “пальцю” з матеріалу Dragon Skin 10 Medium

- DOW SYLGARD 184

При навантаженні 0.1 Н симуляція з DOW Sylgard 184 показала стабільну роботу моделі без зривів процесу. Матеріал поведився передбачувано, демонструючи достатню жорсткість та контрольовану деформацію у межах робочої зони. Деформація - 4,9 мм.

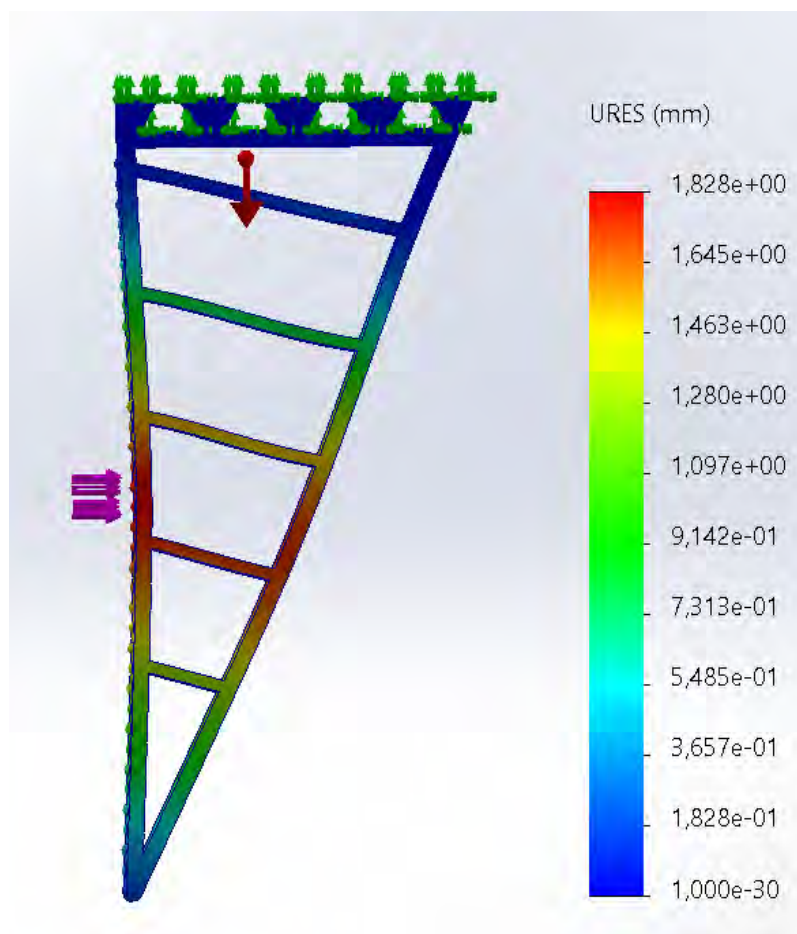


Рисунок 2.8. - Симуляція навантаження “пальцю” з матеріалу Dragon Skin 10 Medium

- SKL-20 Platinum Silicone

При навантаженні 0.1 Н матеріал SKL-20 також показав гарні результати — симуляція проходила без помилок, деформація залишалась робочою, тому прийнято рішення збільшити навантаження на площу до 0.2 Н.

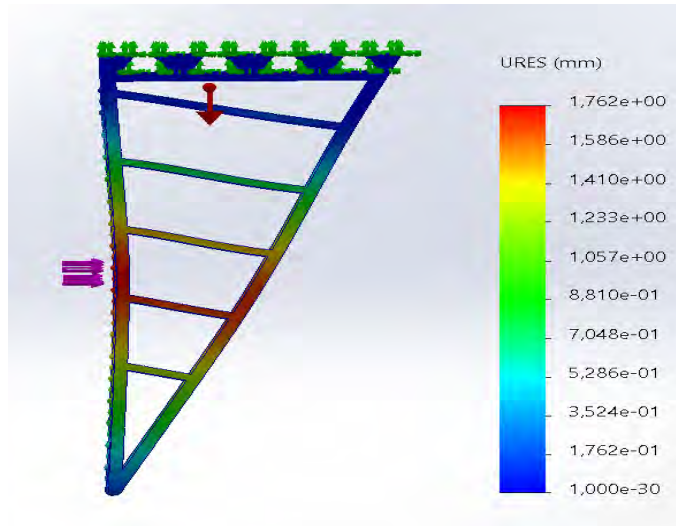


Рисунок 2.10. - Симуляція навантаження “пальцю” з матеріалу Dragon Skin 10
Medium

При збільшенні навантаження до 0.2 Н поведінка матеріалу залишилась стабільною. Деформація склала 13,7 мм, що є повністю прийнятним для м'яких захватів типу Fin Ray

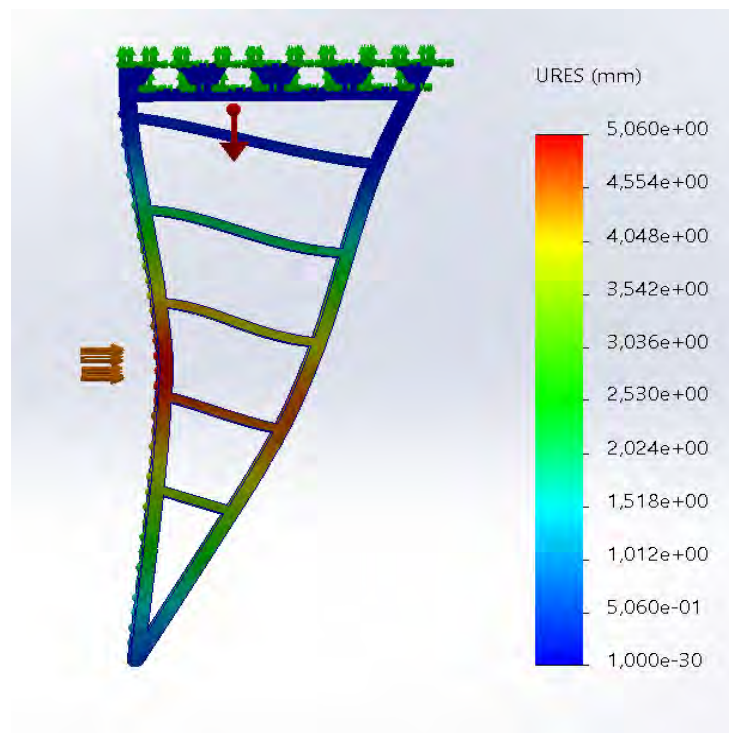


Рисунок 2.11. - Симуляція навантаження “пальцю” з матеріалу Dragon Skin 10
Medium

Отже, для подальшого виготовлення та моделювання зупинимо вибір на SKL-20 Platinum Silicone, оскільки він поєднує саме ті параметри, які потрібні для м'якого захвату типу Fin-Ray: твердість 20 A дає достатню компласентність для делікатного контакту, але при цьому матеріал не «пливе» під власною вагою, як дуже м'які суміші (на кшталт Ecoflex 00-30). Міцність на розрив 5.8 МПа, подовження 490 % і опір роздиранню 19.5 N/mm означають, що ребра й тонкі перетинки витримують багаторазові згини без тріщин — це критично для Fin-Ray, де робота йде саме на великих деформаціях. Низька лінійна усадка ~0.1 % забезпечує точність геометрії після тверднення, а платинове каталізування дає хімічну інертність і стабільність властивостей у часі, що важливо для повторюваності хвату і для роботи поруч із електронікою та клейовими інтерфейсами.

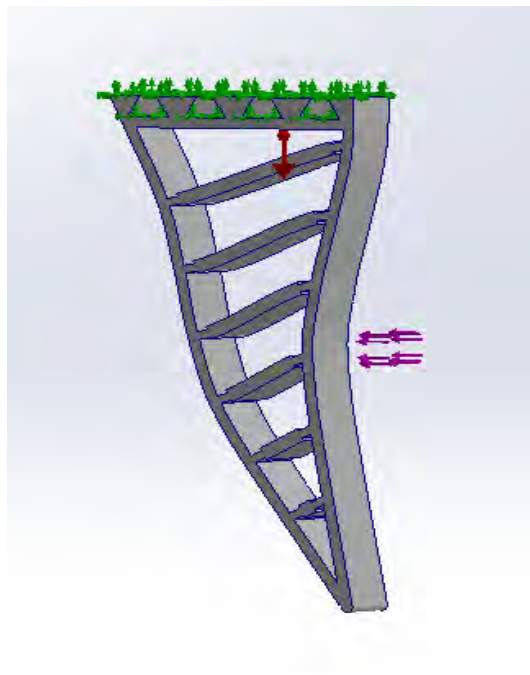


Рисунок 2.12. - Симуляція в солідворксі при прикладенні сили до грані модифікованого захвату

Порівняно з альтернативами, матеріал займає оптимальну «середину»: Ecoflex 00-30 має надто малий E і дає надмірні зсуви/втрату керованості;

Dragon Skin 10 і Mold Star 16 м'якші, але гірше тримають тонкі перемички під боковими навантаженнями; SYLGARD 184 (~43 A) та ELASTOSIL M4601 (~28 A) завеликі за жорсткістю і обмежують адаптивність Fin-Ray. Технологічно SKL-20 зручний: 1:1 за масою, pot-life ~30 хв, cure ~12 год, робочий інтервал -60...+250 °C, платинове каталізування — хімічна інертність, стабільні властивості, сумісність з більшістю адгезивів і вбудованих датчиків (канали, провідні траси, тензо- або ємнісні сенсори).

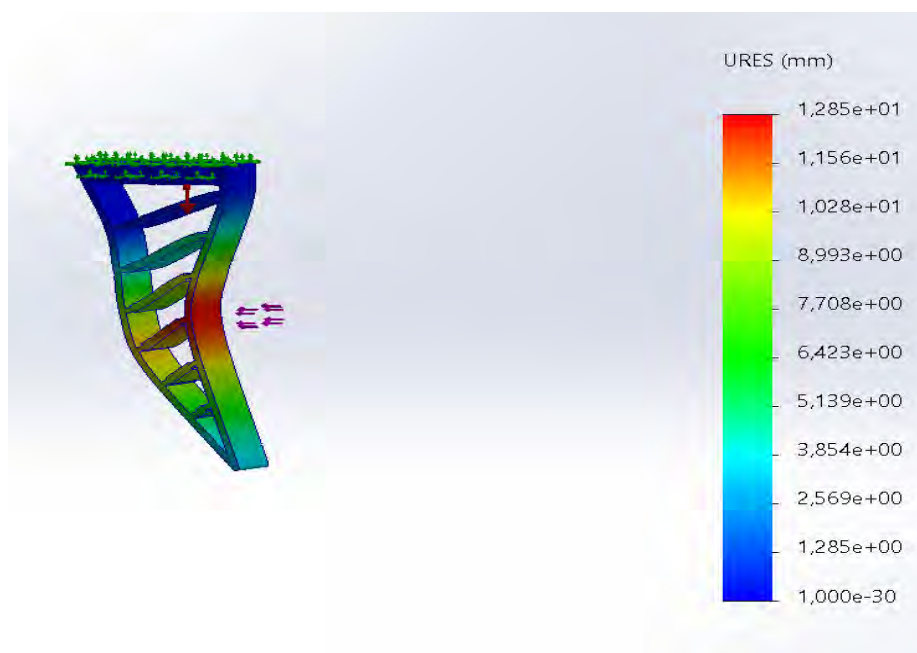


Рисунок 2.13. - Симуляція навантаження в 0.5 Н до модифікованого захвату, деформація 3,3 мм.

У конструкцію захвату було внесено цілеспрямовані геометричні зміни, спрямовані на підвищення ефективності деформації та надійності утримання об'єкта. Зокрема, у зоні з'єднання ребер-перетинок із бічними гранями було видалено невеликий об'єм матеріалу. Така локальна модифікація формує більш гнучку ділянку, яка здатна рівномірніше прогинатися під дією зовнішнього навантаження. У результаті покращується адаптація робочої поверхні до форми об'єкта, зменшується ризик його вислизання та підвищується загальна стабільність хвату. Цей підхід дозволяє оптимізувати

механіку деформації без суттєвого впливу на міцність конструкції, водночас забезпечуючи кращу функціональність м'якого захвату.

Доказ цих припущень можна побачити при симуляції, тепер захват витримує навантаження в 0.5 Н.

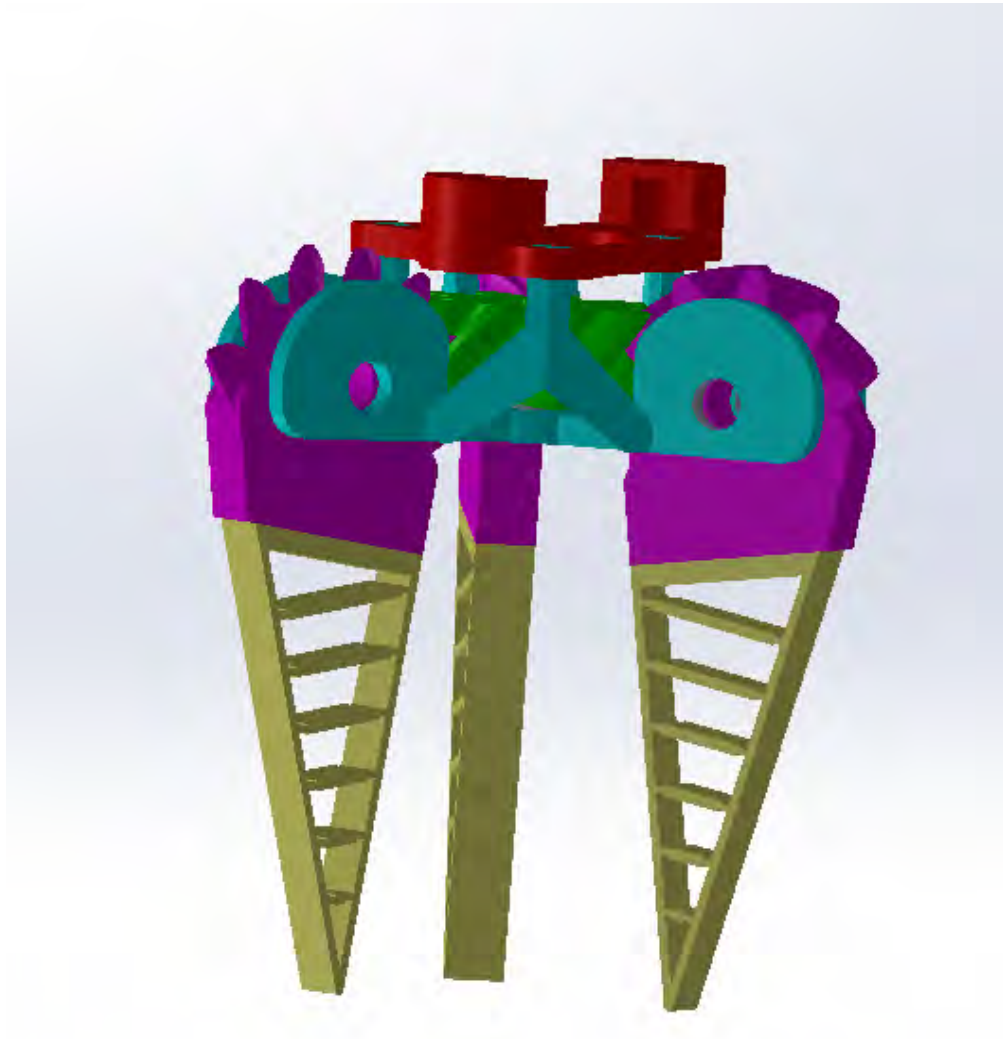


Рисунок 2.14. - Проміжне зображення моделі в соліді

Висновок до розділу

У розділі обґрунтовано вибір пасивно-адаптивного пальця типу Fin-Ray як базової структури захвату: він самопідлаштовується під кривизну об'єкта, потребує мінімум рухомих частин і толерантний до похибок позиціювання, що знижує пікові контактні тиски й спрощує інтеграцію у виробничі процеси . Задано й формалізовано ключові геометричні параметри кут і крок ребер, їх товщину, кількість. Показано їхній вплив на компроміс адаптивність та жорсткість й несуча здатність, а також зафіксовано робочу конфігурацію моделі.

3.МЕХАНІКА. ГВИНТОВА ЗУБЧАСТА ПЕРЕДАЧА

У конструкції приводу гнучкого захвату необхідно забезпечити надійне, плавне та кероване передавання крутного моменту від сервопривода до рухомих ланок. На етапі проектування було розглянуто кілька типів механічних передач, а саме черв'ячну, рейкову та гвинтову зубчасту передачі. З урахуванням вимог до компактності, плавності ходу, точності позиціонування пальців захвату та технологічності виготовлення в даній роботі як основний варіант було обрано гвинтову зубчасту передачу.

Принцип дії гвинтової зубчастої передачі ґрунтується на поступовому входженні в зачеплення декількох пар зубів одночасно. На відміну від прямозубих циліндричних передач, де контакт у переважній більшості випадків здійснюється по одній лінії й навантаження передається більш різко, у гвинтовій передачі контакт має більшу протяжність, а число одночасно задіяних зубців є підвищеним.

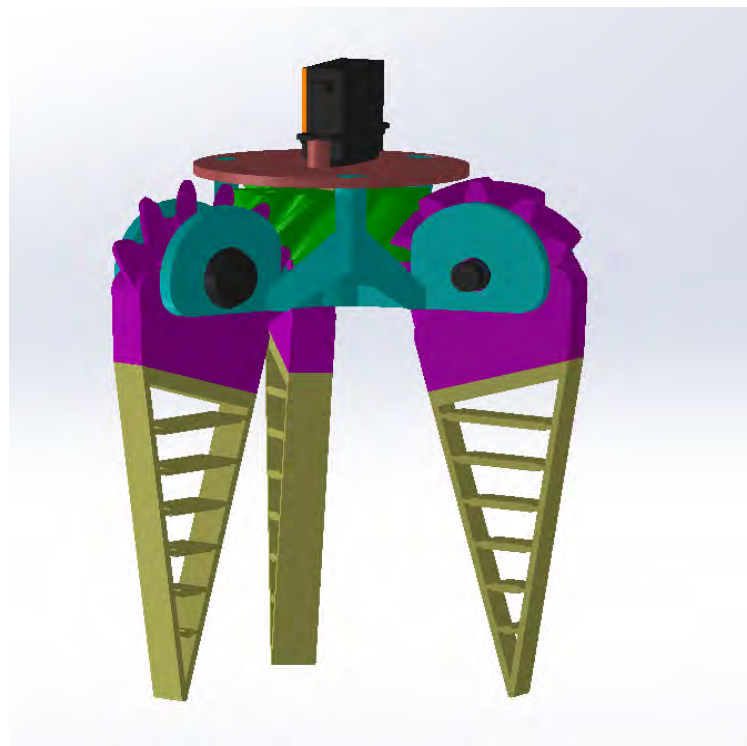


Рисунок 3.1. - Проміжне зображення моделі в соліді

Гвинтова зубчаста передача належить до гіперболоїдних зубчастих передач з паралельним або перехресним розташуванням валів і передбачає використання циліндричних або конічних зубчастих коліс, зуби яких розташовані по гвинтовій (гілікоїдальній) лінії. Для обґрунтування вибору доцільно коротко порівняти гвинтову передачу з черв'ячною та рейковою. Черв'ячна передача також відноситься до гвинтових, але має принципово іншу геометрію: один із елементів є черв'як (гвинт із профілем зуба), а другий — черв'ячне колесо. Така передача дозволяє отримувати дуже великі передаточні числа в одному ступені та часто має властивість часткового або повного самогальмування. Це може бути корисним для механізмів, де необхідно утримувати навантаження без живлення привода. Однак висока відносна ковзність поверхонь у зоні контакту призводить до значних втрат на тертя, підвищеного тепловиділення та нижчого ККД. Для компактного захвату з сервоприводом, який і так здатен утримувати позицію за рахунок власного гальмівного моменту, самогальмування черв'ячної передачі не є критичною перевагою, натомість зниження ККД та ускладнення конструкції є суттєвим недоліком.

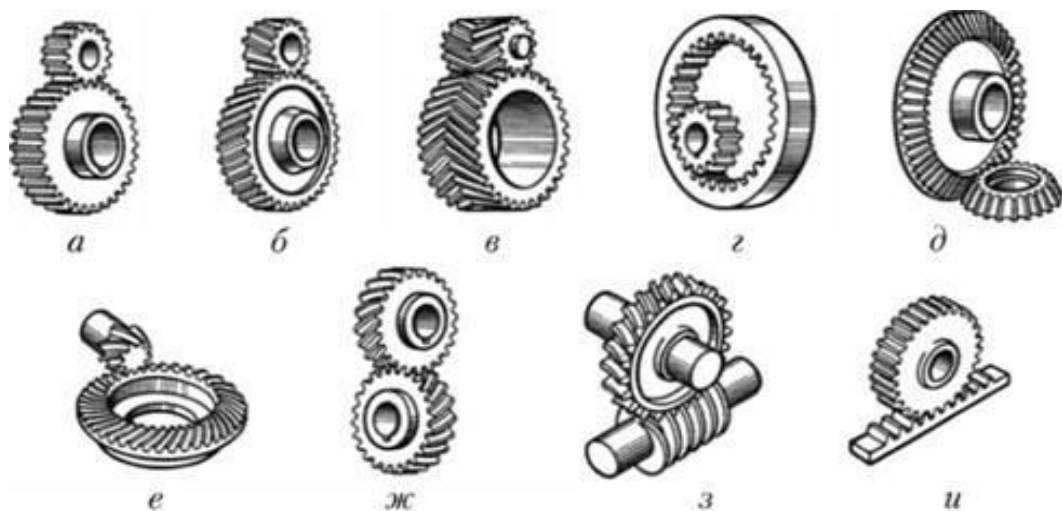


Рисунок 3.2. - Схематичне зображення зубчастих передач. а - циліндрична прямозуба; б - циліндрична косозуба; в - циліндрична шевронна; г - циліндрична з внутрішнім зачепленням; д - конічна прямозуба; е - конічна з криволінійними зубами; ж - циліндрична гвинтова; з - черв'ячна; і - рейкова.

Рейкова передача, в якій обертання шестерні перетворюється на поступальний рух зубчастої рейки, є доцільною тоді, коли кінцевий орган має здійснювати саме лінійні переміщення. В контексті гнучкого захвату, де пальці виконують обертальні або криволінійні рухи навколо шарнірів, використання рейкової передачі вимагало б введення додаткових ланок для перетворення поступального руху в обертальний, що ускладнює конструкцію, збільшує габарити та потенційні люфти. Крім того, відкриті рейкові пари є більш чутливими до забруднення та потребують більшого простору вздовж напрямку руху рейки, що не відповідає вимогам до компактності маніпулятора.

На відміну від цих альтернатив, гвинтова зубчаста передача забезпечує безпосереднє передавання обертового руху між валами, що є природним для сервопривода та механізму пальців. Вона поєднує відносно високий ККД, плавність ходу, можливість реалізувати необхідне передаточне число в одному ступені, прийнятні габарити та конструктивну простоту. Крім того, гвинтові колеса широко стандартизовані, можуть бути виготовлені методами зубофрезерування або придбані як готові елементи, що спрощує подальше виготовлення експериментального зразка захвату.

Для наглядного приклади схематично зобразимо кінематичну схему даного захвату.

Для подальшої розробки механічної частини потрібно розібратись з кількома параметрами шестерень. Першою особливістю гвинтової зубчастої передачі є розташування зубців під кутом до осі вала (кут нахилу зуба β). На відміну від прямозубих коліс, де зуби розташовані паралельно до осі, у гвинтових колесах вони «закручені» по гвинтовій лінії.

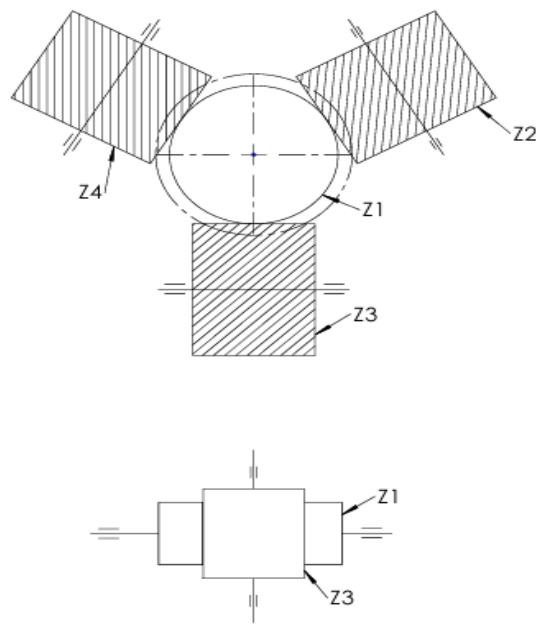


Рисунок 3.3. - Кінематична схема захвату на гвинтово-зубчастій передачі

Для подальшої зручності розрахунків β буде дорівнювати 45 градусів.

Також, оскільки, в конструкції приводу м'якого захвату передбачено розташування вала сервопривода та вала приводу пальця в безпосередній близькості один до одного, що накладає жорсткі обмеження на міжосьову відстань та максимальний діаметр зубчастих коліс. Тому приймаємо міжосьову відстань $a \approx 45$ мм. З метою максимального спрощення кінематичної схеми та програмної частини системи керування прийнято передаточне число передачі $i=1$, тобто кутова швидкість вала сервопривода і вала пальця мають бути однаковими. Це означає, що ділильні діаметри та числа зубів обох коліс є однаковими:

$$u = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1} = 1 \Rightarrow z_1 = z_2, d_1 = d_2 \quad (1)$$

3.1 Вибір двигуна

Для вибору джерела механічного крутного моменту потрібно провести деякі розрахунки. Припустимо для спрощення розрахунків, що пальці геометрично однакові, а навантаження при захопленні симетричного об'єкта розподіляється між ними приблизно рівномірно. Оскільки наш захват моделюється для делікатного захоплення невеликих предметів, нехай вага взята за ту що має підняти захват буде 100 грам. Отже вага нашого об'єкту становити 1 Н, за формулою:

$$F = mg, \text{ де } g = 9,81 \text{ м/с}^2 \quad (2)$$

При трипальцевій схемі кожен палець притискає об'єкт із нормальною силою F_{Π} , а сила тертя на одному контакті дорівнює μF_{Π} , де μ – коефіцієнт тертя силікону по матеріалу об'єкта. Прийmemo, що $\mu=0,5$. Також нехай виконується умова рівноваги за вагою в вертикальному напрямку, тоді:

$$3\mu F_{\Pi} \geq P \quad (3)$$

Звідси сила, яку має створювати один палець,

$$F_{\Pi} \geq \frac{P}{3\mu} = \frac{1}{3 \cdot 0,5} \approx 0,67 \text{ Н}. \quad (4)$$

Отже, сумарна нормальна сила трьох пальців

$$F_{\text{заг}} = 3F_{\Pi} \approx 3 \cdot 0,67 \approx 2 \text{ Н} \quad (5)$$

Тепер для вибору мотора переведемо силу в крутний момент

Нехай відстань від осі обертання пальця до зони контакту з об'єктом становить

$$l = 30 \text{ мм}$$

Тоді момент, який має розвивати привід одного пальця,

$$T_{\Pi} = F_{\Pi} \cdot l \approx 0,67 \cdot 0,03 \approx 0,02 \text{ Н/м} \quad (6)$$

а сумарний момент на загальному вихідному валу механізму трьох пальців:

$$T_{\text{вих}} = 3F_{\text{п}} = F_{\text{заг}} \cdot l \approx 1,96 \cdot 0,08 \approx 0,157 \text{ Н/м} \quad (7)$$

Гвинтова зубчаста передача має передаточне число $i=1$ і ККД $\eta \approx 0,9$, тому вона практично не змінює величину моменту, а лише вносить втрати:

$$T_{\text{вих}} = T_{\text{серво}} \cdot u \cdot \eta = T_{\text{серво}} \cdot \eta \quad (8)$$

$$T_{\text{серво}} = \frac{T_{\text{вих}}}{\eta} \approx \frac{0,157}{0,9} \approx 0,174 \text{ Н/м} \quad (9)$$

Для урахування динамічних навантажень, тертя в шарнірах, можливих перекосів деталі та неточностей моделі вводиться коефіцієнт запасу $k_{\text{зап}}=2$:

$$T_{\text{серво,потр}} = k_{\text{зап}} \cdot \frac{T_{\text{вих}}}{\eta} = 2 \cdot \frac{0,157}{0,9} \approx 0,349 \text{ Н/м} \quad (10)$$

$$T_{\text{серво,потр}} \approx \frac{0,349}{0,098} \approx 3,6 \text{ кг/см} \quad (11)$$

Для запасу будемо шукати сервомотори з номінальним моментом не менше 4-5 кг/см. Кут повороту в таких захватах становить зазвичай 60 градусів, а швидкість відкриття нам не принципова. За даними характеристиками можемо вибрати декілька гарних варіантів сервомоторів. Для цього захвату та подальшого моделювання виберемо Corona DS339MG



Рисунок - 3.5. Фото сервомотору Corona DS339MG

3.2 Вибір датчика тиску

Для створення композитного м'якого захвату найкращим вибором для датчиків зусилля були б провідні наповнювачі для сенсорики: сажа, CNT та графен, срібні пластівці. Проте для спрощення виконання фізичного прототипу спробуємо інтегрувати готовий датчик тиску в силіконове тіло гнучкого захвату. Для цього узгодимо потрібні характеристики, підберемо та порівняємо різні датчики й виберемо той що буде найбільше відповідати нашим вимогам.

Отже, основні вимоги були сформовані виходячи з діапазону робочого зусилля, необхідності контролю моменту дотику, стабільності роботи під вигином, а також мінімальної товщини, оскільки сенсор планувалося розміщувати безпосередньо під “подушечкою” пальця, у шарі еластомеру. Приблизні предмети, які плануються підійматись мають вагу 500 грамів.

Під час аналізу доступних типів сенсорів були розглянуті тензорезистивні датчики, п'єзоелектричні елементи, ємнісні сенсори та силові резистивні датчики (FSR). Отже, детально розглянемо кожен тип. П'єзоелектричні елементи показують високу чутливість до ударних коливань, проте вони непридатні для повільних квазістатичних навантажень, характерних для захвату — їх сигнал спадає при сталому тиску, що робить їх неефективними для контролю критичної сили захоплення. Ємнісні сенсори забезпечують плавне й точне вимірювання невеликих деформацій, однак вони потребують жорсткої геометрії електродів і стабільного зазору, що неможливо гарантувати всередині силіконового пальця, який постійно змінює форму під навантаженням. Тензорезистивні сенсори мають високу точність, але їхня інтеграція у м'які конструкції ускладнена — вони погано переносять повторні вигини, потребують ретельної механічної фіксації, а їх чутливість знижується при локальному зсуві матеріалу. Силові резистивні датчики зберігають працездатність при вигині, мають мінімальну товщину (до 0,4 мм), не

створюють локальної жорсткості, легко вбудовуються у силіконовий шар і забезпечують вимірювання сили в цілком достатньому робочому діапазоні. А отже є ідеальним варіантом для нашої розробки [12].

З огляду на попередні критерії, а також на доступність на ринку було обрано датчик тиску FSR-400, який відповідає вимогам за товщиною, робочим діапазоном сили та здатністю працювати в умовах постійної деформації силіконового пальця.



Рисунок 3.6. - Зображення датчика сили

Розглянемо детально, які характеристики має даний датчик та які обмеження. Отже, Force Sensing Resistor (FSR) – полімерний товстоплівковий (PTF) сенсор, опір якого зменшується зі зростанням прикладеної сили. Геометрія датчику: діаметр сенсора – 7,62 мм., активна зона – близько 5,08 мм., а номінальна товщина – 0,35 мм.

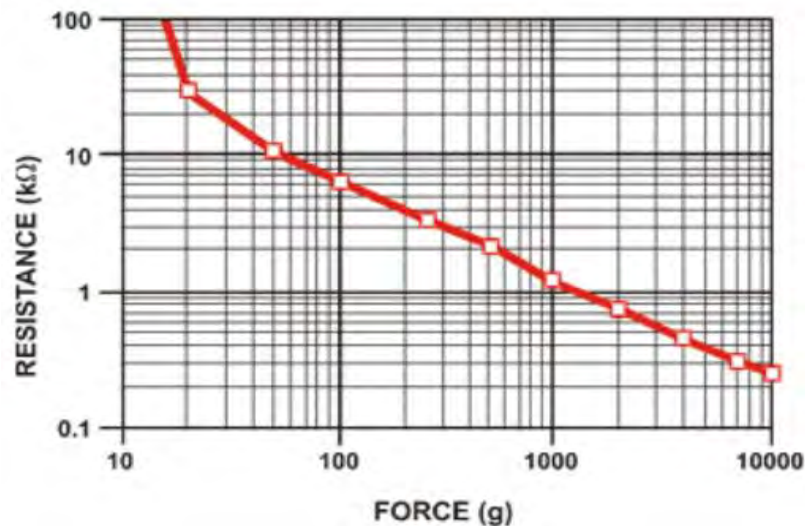


Рисунок 3.7. - Типова крива сили взята з даташиту датчику FSR 400

Таблиця 3.1. - Характеристики датчику FSR 400

Параметр	Значення	Одиниця
Сила спрацювання	0.1	Н
Діапазон чутливості по силі	0.1–10.0	Н
Повторюваність сили (один сенсор)	±2	%
Опір без навантаження	10	МОм
Розмір	7.62	мм
Діапазон товщини	0.2–1.25	мм
Stand-off опір	>10	МОм
Хід перемикання	0.05	мм
Гістерезис	+10	%
Час наростання сигналу	<3	мкс
Робочий температурний діапазон	-30...+70	°C
Кількість спрацювань	10000000	циклів
Типова товщина	0.35	мм

3.3 Вибір мікроконтролера

Для подальшої розробки м'якого захвату, система потребує мікроконтролера. У даній системі контролер виконує чотири основні функції: зчитування аналогового сигналу від датчика тиску FSR-400, обчислення порогового значення для визначення моменту контакту, генерацію PWM-сигналу для сервопривода та організацію обміну даними з персональним комп'ютером, що виступає зовнішнім керуючим вузлом. Таким чином, контролер працює у змішаному режимі: локально реалізує мінімально необхідну логіку та одночасно отримує команди від ПК щодо стану або режиму роботи захвату [16].

Виходячи з архітектури системи, сформовано такі вимоги до мікроконтролера. Контролер має містити щонайменше один аналоговий канал для вимірювання сили натискання датчика FSR-400 та один апаратний або програмно реалізований канал PWM для керування сервоприводом. Крім того, потрібен інтерфейс послідовного обміну для передачі даних та отримання команд від ПК. Обчислювальні вимоги мінімальні: алгоритм включає порівняння з порогом та формування керуючого сигналу. Обсяг пам'яті також може бути невеликим — 2–8 кБ Flash достатньо для реалізації такої логіки. З урахуванням конструктивних обмежень м'якого захвату важливою є компактність контролера та низьке енергоспоживання. Пристрої з великою кількістю периферії чи розширеними інтерфейсами для цього проекту не потрібні. Отже для подальшого вибору контролера подивимось на порівняльну таблицю габаритно малих мікроконтролерів: ATtiny85, ATmega328P (Arduino Nano), ESP8266, STM32F030F4. Всі дані взяті з офіційних даташитів компонентів.

Таблиця 3.2. - Порівняльна таблиця характеристик мікроконтролерів

Параметр	ATtiny85	ATmega328P (Arduino Nano)	ESP8266	STM32F030 F4
Кількість виводів	8	30	30	20
Аналогові входи (ADC)	1	8	1	10
PWM-виходи	2	6	4	6
UART	Програмний (Software Serial)	Апаратний UART	Апаратний UART	Апаратний UART
Частота роботи	8–20 МГц	16 МГц	80 МГц	48 МГц
Flash-пам'ять	8 кБ	32 кБ	4 МБ	16 кБ
Енергоспоживання	Дуже низьке	Низьке	Середнє	Низьке
Габарити	Дуже малі	Середні	Середні	Малі
Вартість	Дуже низька	Середня	Середня	Низька
Складність програмування	Низька	Низька	Середня	Середня
Надлишковість для задачі	Немає	Висока	Дуже висока	Висока
Підходить для компактних конструкцій	Так	Частково	Ні	Так

Результати порівняння показують, що контролери на базі ATmega328P (Arduino Nano) забезпечують апаратний UART і зручність програмування, але

мають надлишкові габарити та вартість. Мікроконтролери сімейств ESP8266 та ESP32 пропонують бездротові інтерфейси, однак споживають більше енергії та значно перевищують потреби проєкту за обчислювальною потужністю. Платформи STM32 мають потужну периферію, але є технологічно складнішими й менш доцільними для конструкції, де достатньо роботи одного аналогового каналу та одного PWM-виходу.

Отже, найбільш раціональною групою для такої задачі є сімейство ATtiny — компактні мікроконтролери з мінімально необхідною функціональністю.

Серед них ATtiny85 повністю відповідає вимогам. Контролер має 8-вивідний корпус, що дозволяє інтегрувати його у малогабаритний корпус м'якого захвату, містить один повноцінний АЦП-канал і декілька таймерів, достатніх для генерації PWM. Частота роботи 8–20 МГц та об'єм пам'яті 8 кБ забезпечують достатній ресурс для виконання локальної логіки та обробки сигналів датчика. Низьке енергоспоживання й простота інтеграції роблять ATtiny85 технічно та економічно обґрунтованим вибором для прототипу м'якого захвату з дистанційним керуванням.

Таким чином, з огляду на функціональні вимоги, компактність конструкції та мінімальну складність системи, оптимальним рішенням є використання мікроконтролера ATtiny85 як виконавчого обчислювального вузла.

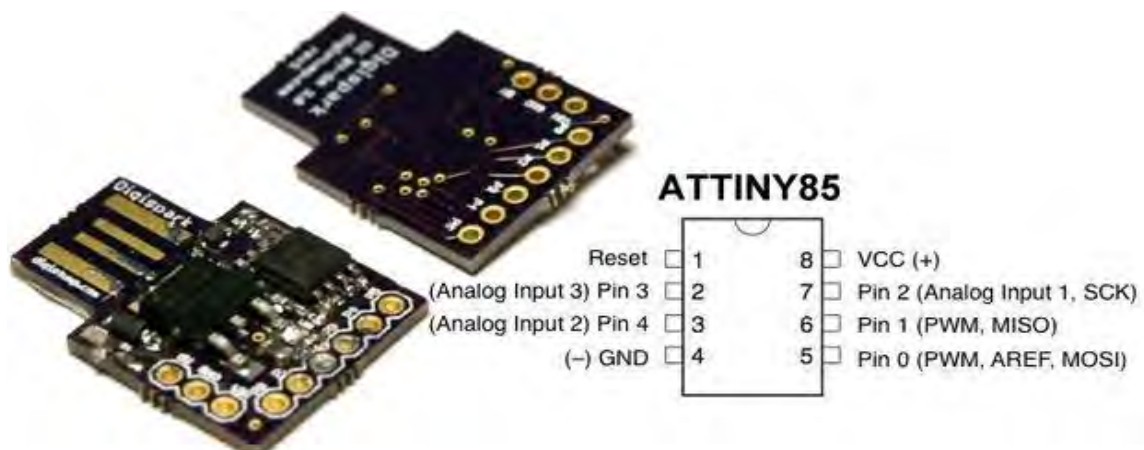


Рисунок 3.8. - Зображення прикладу модуля з мікроконтролером ATtiny85 та стандартна схема розташування виводів

3.4 Розробка електроніки

Для тестування академічного прототипу розробимо електронну плату з якій буде здійснюватись безпосереднє керування нашим м'яким захватом. Для розробки плати на основі контролера ATtiny85 була вибрана програма Altium Designer. Маючи всі складові майбутнього захвату, бо прийнято рішення розробити власну плату для примітивного керування сервою.

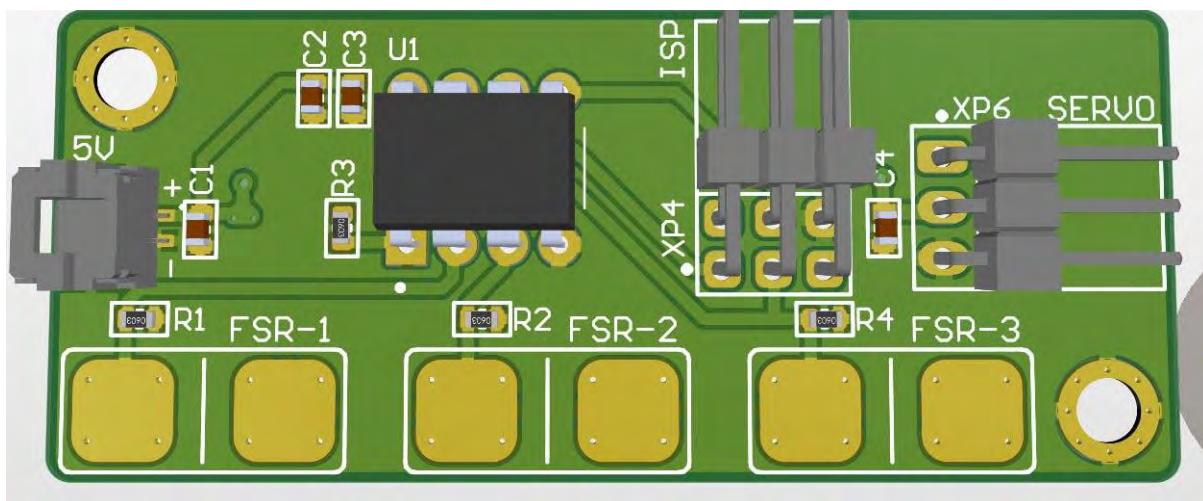


Рисунок 3.9. - Модель спроектованої плати на базі контролера ATtiny85 для тестування захвату

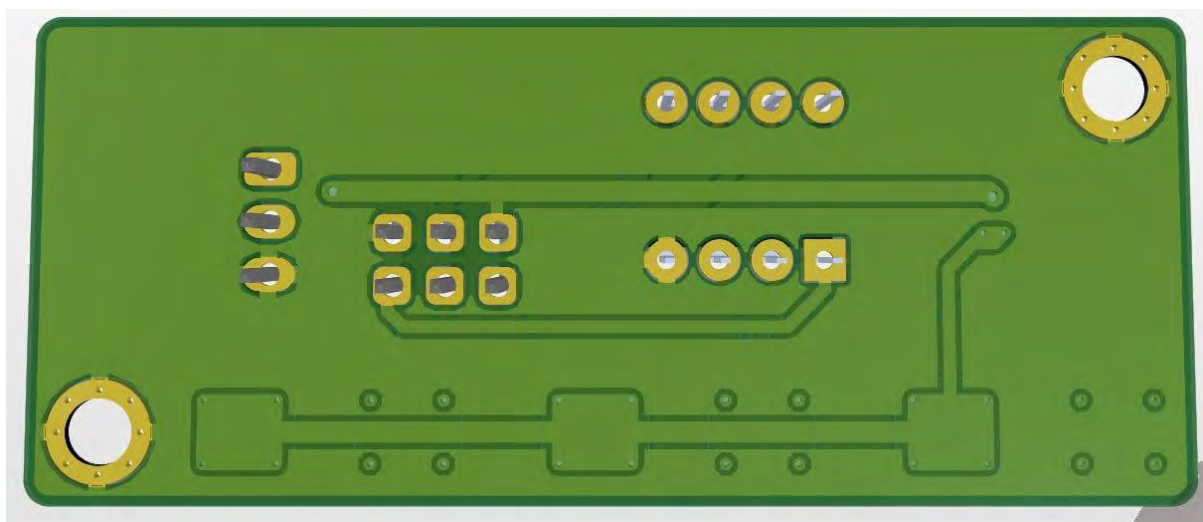


Рисунок 3.10. - Модель спроектованої плати на базі контролера ATtiny85 для тестування захвату (зворотня сторона)

Для розробки плати використовувалось програмне забезпечення Altium Designer.

Надається за зверненням до авторів

Рисунок 3.11. - Принципова схема електронного модуля керування захватом

Для гіпотетичної перевірки плати та задумки проєкту в програмі Tinkercad була проведена симуляція роботи. Був також написаний код на C++ (Arduino C/C++). Код реалізує просту логіку роботи захвату де натиснення на кнопку замінює сигнал від маніпулятора щодо роботи. Після ініціалізації пінів виконується опитування кнопки з програмним придушенням дрібездгу контактів; у разі натискання розпочинається плавне закриття серво від початкового до заданого граничного положення. На кожному кроці зчитуються значення трьох FSR-датчиків сили, і при перевищенні ними заданого порогового значення рух сервопривода зупиняється.

Код:

Надається за зверненням до авторів

Результати що ми отримали:

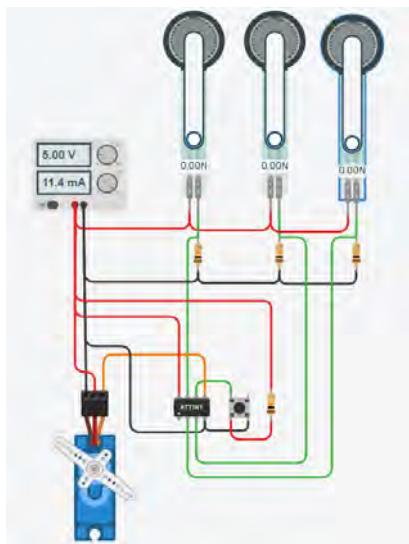


Рисунок 3.12 - Система в стані спокою

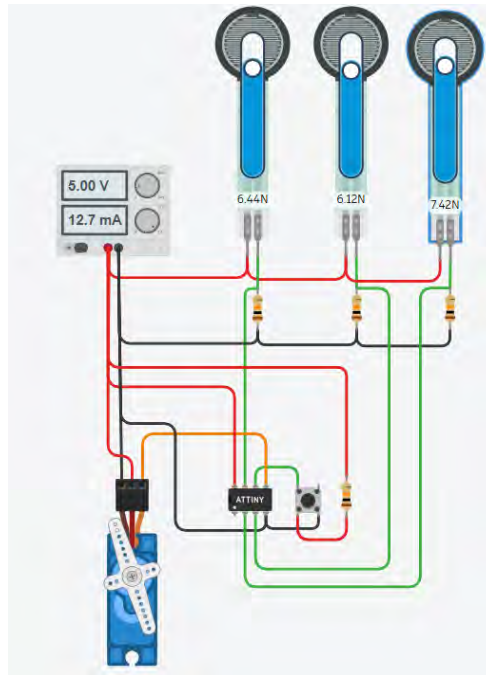


Рисунок 3.13 - Подане навантаження на датчики, що симулює захоплення предмету

Висновок до розділу

Отже, перевірено базовий електронний модуль керування м'яким захватом на мікроконтролері ATtiny85. Спроектовано друковану плату з трьома FSR-датчиками сили, сервоприводом, роз'ємами живлення та ISP-програмування, що забезпечує компактне розміщення елементів і можливість прямого підключення до академічного прототипу. Реалізований програмний код на C++ (Arduino) організовує опитування кнопки з антидребезгом, плавне переміщення сервопривода та зупинку захвату при досягненні заданого порогу сили одночасно на трьох FSR-сенсорах, що дає простий замкнений контур керування з обмеженням зусилля.

Гіпотетичну працездатність модуля перевірено в середовищі Tinkercad: змодельовано стан спокою системи та режим із навантаженням на датчики, що імітує захоплення об'єкта. Результати симуляції підтвердили коректну реакцію плати на зміну сигналів FSR та адекватну роботу алгоритму керування сервоприводом.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Лиття силіконового захвату в форму

Оскільки для фізичного виготовлення захвату було обрано технологію лиття силікону в 3D-друковану форму, на цьому етапі були детально опрацьовані як послідовність операцій, так і типові труднощі, що виникають під час процесу. Такий підхід дозволив не лише отримати працездатний зразок захвату, але й перевірити на практиці придатність обраної конструкції Fin-Ray та матеріалу силіконового композиту до реального виготовлення.

Форма для лиття була спроектована за геометрією тривимірної моделі пальця захвату з урахуванням площини рознімання та напрямку виймання деталі. Конструкція форми була вибрана найбільш примітивна для легкого виготовлення та швидкості. Форма виготовлялася методом FDM-друку з термопластика, що є доступним і достатнім за точністю для експериментальних зразків.



Зображення 4.1. - Фото молду для відливання силікону

Перед заливанням силікону внутрішні поверхні форми очищалися від пилу та залишків підтримуючих структур, після чого наносився роздільний шар (антиадгезив), сумісний із вибраним силіконом. Це було необхідно для запобігання прилипання матеріалу до пористої поверхні 3D-друку та полегшення подальшого вилучення готового виробу. Нанесення антиадгезиву варто здійснювати дуже обережно, пензликом та проходитись по всіх поверхнях форми. Після нанесення варто видалити залишки роздільовача, оскільки скупчення антиадгезиву може вплинути на застигання силікону та нерівномірне розподілення в формі.

Приготування силіконового композиту здійснювалося відповідно до рекомендацій виробника матеріалу (SKL-20 Platinum Silicone): компоненти базового силікону та затверджувача відмірювалися за масою у заданій пропорції (1:1) та ретельно змішувалися до однорідного стану.



Рисунок 4.2. - Фото реактивів та силікону що використовувався

Важливим моментом було обмеження часу між змішуванням та заливанням через обмежений робочий час суміші, а саме 30 хв, оскільки саме після півгодини силікон починає кристалізуватись, що повністю перешкоджає подальшій роботі. У домашніх умовах використання вакуумної камери для дегазації було неможливе, тому зменшення кількості бульбашок повітря

забезпечувалося за рахунок повільного перемішування, повільного лиття тонким струменем та легкого вібраційного навантаження на форму після заливки.

На практиці виявилося, що при заливанні силікону найпроблемнішими зонами є тонкі ребра Fin-Ray та місця різкої зміни перерізу, де повітря може «застрягати», а силікон — не доходити в повному обсязі. Перші пробні відливки показали локальні недоливи в тонких ділянках та порожнини від бульбашок.

Полімеризація силікону відбувалася при кімнатній температурі, час витримки приймався з запасом відносно мінімальних значень, зазначених у технічному описі матеріалу, щоб забезпечити повне твердіння навіть у масивніших ділянках перетину.

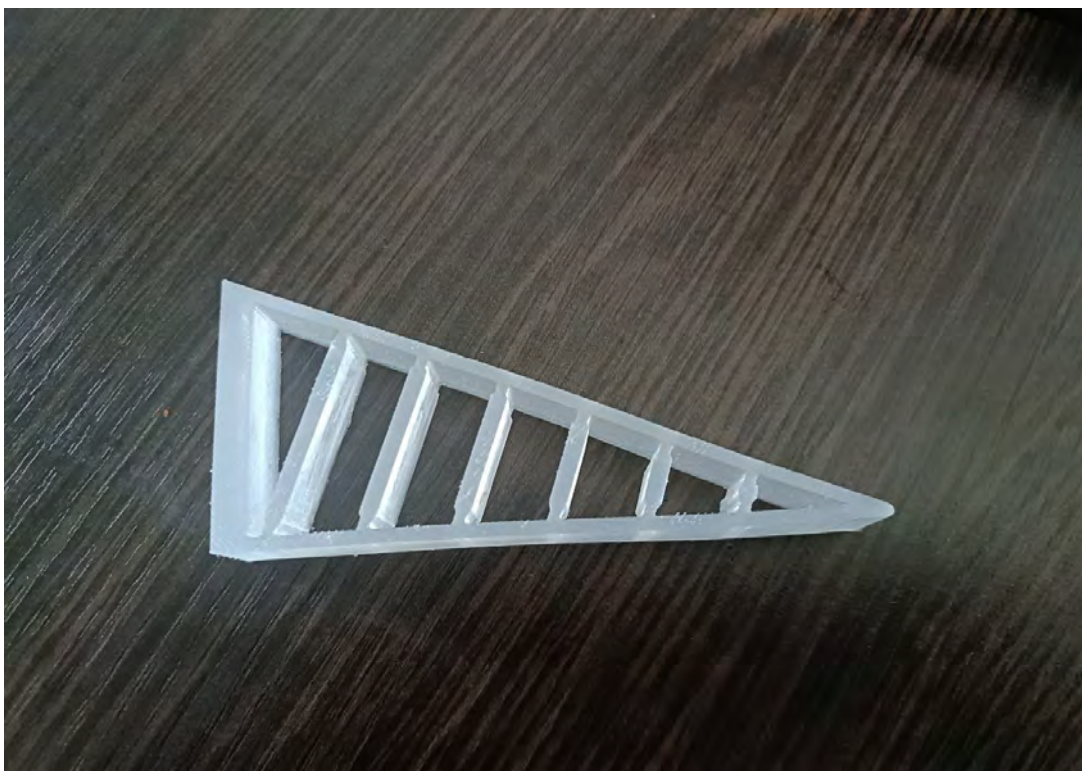


Рисунок 4.3. - Фото першого захвату без армування, генерації 1

Таким чином, в межах експериментальної частини було не лише відлито працездатний силіконовий палець захвату механічна поведінка, якого

повністю відповідає запланованій. Після тестування було прийнято рішення збільшити товщину граней з метою можливості збільшення навантаження на палець.



Рисунок 4.4. - Фото роботи захвату під навантаженням

В подальшому було виготовлено декілька тестових зразків з збільшеною товщиною грані та з вбудованою вуглецевою тканиною.

Метою модифікації стало підвищення жорсткісних характеристик окремих зон та уточнення впливу локального армування на деформаційну поведінку Fin-Ray-структури.

Для дослідження оптимальної схеми укладки композиту було створено два тестові варіанти зразків, що відрізнялися розташуванням армувального шару. У першому варіанті вуглецеву тканину було інтегровано у товщу грані, з боку майбутнього контакту із об'єктом. Такий підхід мав на меті зменшити локальні прогини та підвищити стабільність форми під час навантаження. У

другому варіанті армування виконували в зоні ребер-перетинок, що дозволило оцінити, як зміна жорсткості несучої внутрішньої структури впливає на загальну гнучкість та рівномірність деформації під час обхвату.



Рисунок 4.5. - Фото варіацій пальців

Отже, під час експериментальних досліджень було проведено серію випробувань трьох варіантів захватів: базової конструкції без армування, зразок без армування, але зі збільшеною товщиною зовнішніх граней, зразка з інтегрованою вуглецевою тканиною у зовнішню грань та зразка з армуванням у зоні ребер. Кожен зразок тестували в умовах контакту зі сферичним об'єктом в порівнянні, що дозволило простежити зміни у характері деформації та у стабільності утримання.



Рисунок 4.6. - Порівняння деформації базової конструкції без армування та зразок без армування, але зі збільшеною товщиною зовнішніх граней.



Рисунок 4.7. - Порівняння деформації базової конструкції з потовщеними граннями та зразка з інтегрованою вуглецевою тканиною у зовнішню грань.



Рисунок 4.8. - Порівняння деформації базової конструкції з потовщеними граннями та зразка з армованими ребрами

Випробування зразка з інтегрованою вуглецевою тканиною у зовнішню грань показали подальше зростання жорсткості на стороні контакту. Армована грань деформувалася найменше, що забезпечувало точнішу та стабільнішу фіксацію об'єкта, але водночас вносило асиметрію у загальну деформацію конструкції.

У зразку з армуванням у зоні ребер зміни поведінки мали інший характер: жорсткість підсилювалася не на поверхні, а у внутрішній структурі, що обмежувало рух перетинок, але зберігало м'якість зовнішньої частини. Завдяки цьому деформація залишалась плавною та рівномірною, а хід пальця — передбачуваним і контрольованим.

Узагальнені результати свідчать, що збільшення товщини граней та інтеграція вуглецевої тканини впливають на деформаційні властивості по-різному.

Отже, проведені експериментальні дослідження показали, що зразок із вуглецевою тканиною, розміщеною у зоні ребер-перетинок, найкраще відповідає вимогам до роботи м'якого Fin-Ray-захвату. Саме така конфігурація забезпечила оптимальне поєднання гнучкості та стабільності: деформація залишалася плавною й рівномірною, внутрішня структура працювала передбачувано, а траєкторія руху пальця не втрачала природності. На відміну від армування зовнішньої грані, посилення ребер не створювало асиметрії та не знижувало якість обхвату, зберігаючи необхідну м'якість зовнішньої поверхні при одночасному покращенні стійкості внутрішніх елементів. Таким чином, ми отримали конструкцію, яка не лише рівномірно деформується та демонструє контрольований хід пальця, але й краще витримує повторні навантаження, зменшує ризик локальних пошкоджень у силіконовій матриці та підвищує довговічність виробу.

5.АНАЛІЗ ТА ВИБІР КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ МАНІПУЛЯТОРА

5.1. Порівняння типових кінематичних структур

У промисловій робототехніці кінематична структура маніпулятора визначає форму його робочої зони, точність, жорсткість та динамічні властивості. У контексті взаємодії з м'якими захватними пристроями, такими як Fin-Ray, важливими є плавність руху, повторюваність, можливість силового керування та контрольована взаємодія з об'єктом. В попередніх розділах ми вже визначили, які вимоги до маніпулятора маємо та визначили тип сомого захвату. Тут же спробуємо розглянути кінематичні структури маніпулятор для остаточного вибору [21, 22].

Шарнірні шестикоординатні маніпулятори (антропоморфного типу) сьогодні є стандартом де-факто для більшості задач промислової та колаборативної робототехніки. Послідовне з'єднання шести обертальних ланок (три для позиціонування «зап'ястя» і три для орієнтації інструмента) забезпечує повноцінний рух у тривимірному просторі з можливістю довільно задавати положення та орієнтацію робочого органу. Такі роботи відносно компактні, легко інтегруються в існуючі виробничі лінії, дозволяють працювати в обмеженому просторі та формувати складні траєкторії, що важливо при роботі з м'яким захватом, який адаптивно огортає деталь.

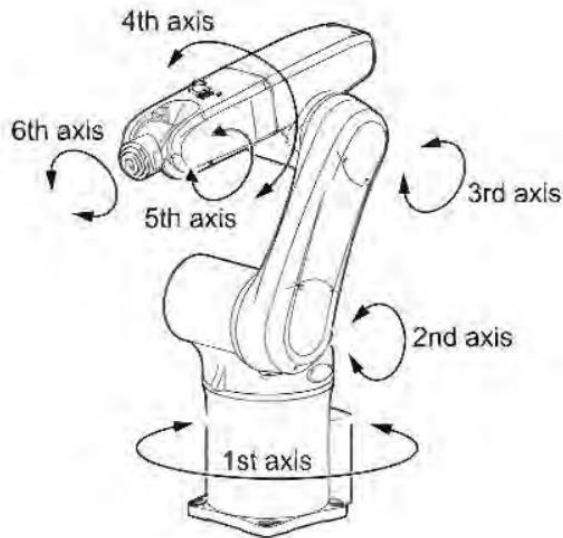


Рисунок 5.1. - Схема приклад роботу типу шарнірний

Маніпулятори типу SCARA забезпечують високу швидкість та точність у площині XY, але мають суворі обмеження щодо орієнтації інструмента. Через це вони застосовуються переважно у складанні електронних компонентів і менш придатні для інтеграції м'яких захватів складної форми.

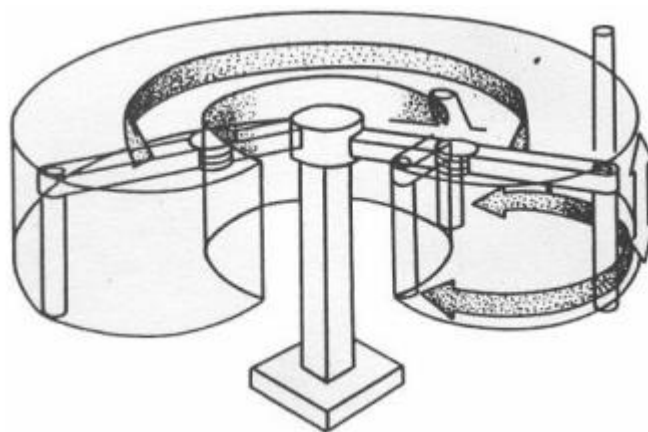


Рисунок 5.2. - кінематична схема маніпулятору типу SCARA

Циліндричні та сферичні маніпулятори частково зберігають простоту декартової схеми, але за рахунок введення обертальних осей забезпечують більшу гнучкість доступу в робочий простір. Вони ефективні у випадках, коли потрібна робота навколо технологічного обладнання (верстати, конвеєри) або

обслуговування об'ємних установок. Водночас, через специфічну геометрію та обмеження по орієнтації торця, ці схеми менш універсальні для операцій точного складання, де потрібно довільне орієнтування інструмента у тривимірному просторі.

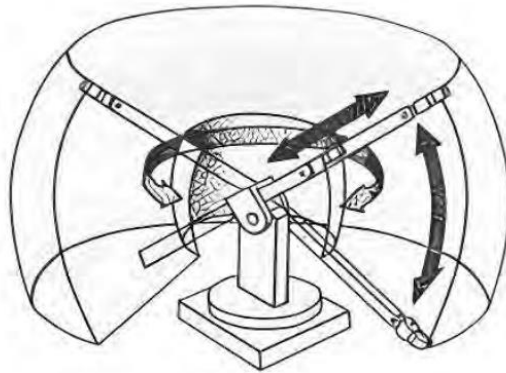


Рисунок 5.3. - кінематична схема маніпулятора сферичного типу

Delta-роботи мають надзвичайно високу швидкість, проте їхня конструкція орієнтована на легкі деталі з вертикальною орієнтацією захвату. Має можливості працювати з вразливими об'єктами обмежені жорсткою кінематикою та високими динамічними навантаженнями.



Рисунок 5.4 - Приклад Delta-роботу ABB IRB 360 FlexPicker

З огляду на це універсальна шарнірна RRR-структура, характерна для колаборативних роботів, є найбільш сумісною з гнучкими Fin-Ray захватами, оскільки вона забезпечує широкий діапазон рухів,

5.2. Обґрунтування вибору структури

Як описано попередньо для реалізації маніпуляцій із м'яким захватом Fin-Ray потрібен маніпулятор, здатний:

- працювати у колаборативному режимі зі зниженими динамічними навантаженнями;
- забезпечувати точне позиціонування та контроль прикладеної сили;
- компенсувати деформацію захвату при контакті з об'єктом;
- мати велику орієнтованість інструмента в обмежених просторах.



Рисунок 5.5. - Фото маніпулятора franka emika panda

З огляду на ці критерії доцільним є застосування шарнірної багатоланкової структури з шістьма або сімома ступенями свободи. Такі маніпулятори дають можливість орієнтувати захват у будь-якому положенні, повторювати криволінійні траєкторії та використовувати датчики моменту у приводах.

В цьому випадку для цього дослідження найефективніше буде вибрати Franka Emika Panda, оскільки він має найкраще співвідношення точності, чутливості та інтегрованих силомоментних датчиків, що робить його оптимальним рішенням для роботи з Fin-Ray конструкцією.

5.3. Опис обраної кінематичної схеми та робоча зона

На рисунку 5.6. наведено кінематичну схему шестиосьового робота-маніпулятора franka emika panda з ланками та ступенями свободи

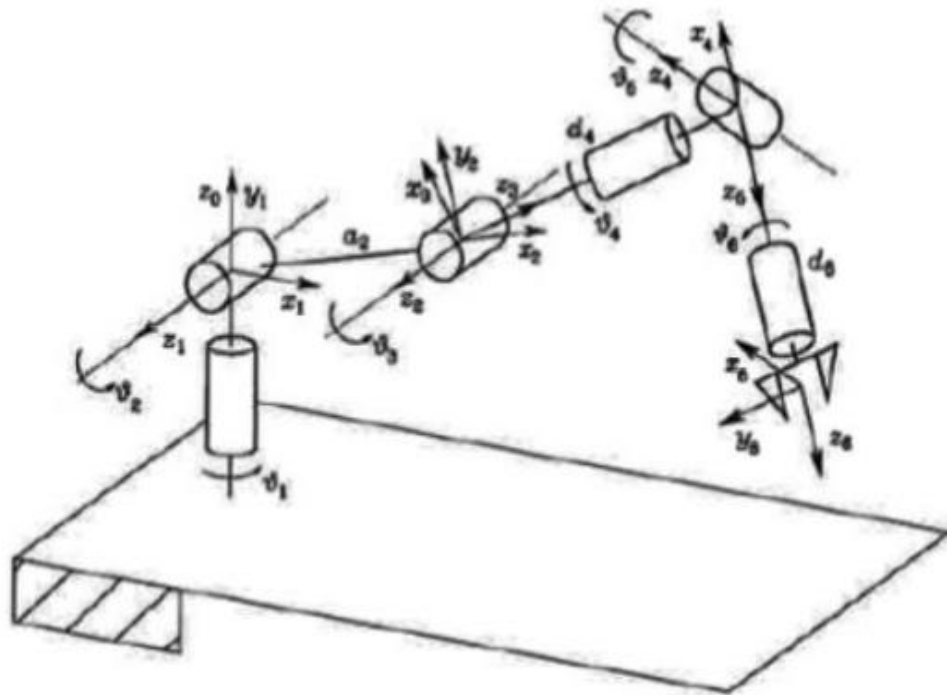


Рисунок 5.6. - Кінематична схема шестиосьового робота-маніпулятора franka emika panda з ланками та ступенями свободи

Опишемо кінематику роботи даного робота:

Таблиця 5.1. - Вузли робота та ланки

Вузол	Ось	Функція	Діапазон обертання	Ланки
Основа	J1	Обертання навколо вертикальної осі	$\pm 170^\circ$	Основа – Плече
Плече	J2	Обертання навколо горизонтальної осі	$\pm 130^\circ$	Плече – Ліктьовий Сустав
Ліктьовий сугав	J3	Обертання навколо горизонтальної осі	$\pm 150^\circ$	Ліктьовий сугав – Зап'ястя
Зап'ястя	J4	Обертання навколо осі, паралельної плечу	$\pm 190^\circ$	Передпліччя – Зап'ястя
Обертання зап'ястя	J5	Обертання навколо осі, перпендикулярної до J4	$\pm 120^\circ$	Зап'ястя – Інструмент
Обертання інструмента	J6	Обертання кінцевого ефектора	$\pm 360^\circ$	Інструмент

Робоча зона обраного шарнірного колаборативного маніпулятора Franka Emika Panda визначається геометрією ланок, діапазонами повороту окремих осей (J1–J6) та конфігурацією робочого місця. У загальному випадку вона являє собою тривимірний об'єм у вигляді «деформованого тора» навколо основи, в якому інструмент може досягати заданих точок із різною орієнтацією. Основними обмеженнями робочої зони є граничні кути повороту кожного з вузлів, зони можливого самоуникнення (зіткнення ланок між собою) та колізії із зовнішніми об'єктами — столом, корпусами пристроїв, елементами огорожі.

Висновок до розділу

Проведений аналіз показав, що хоча SCARA-, циліндричні, сферичні та Delta-маніпулятори ефективні у своїх типових задачах, їхні обмеження за орієнтацією інструмента, конфігурацією робочої зони та режимами динаміки роблять їх менш придатними для роботи з м'яким Fin-Ray захватом у задачах точного складання. На цьому тлі шарнірні антропоморфні маніпулятори з RRR-структурою забезпечують необхідну гнучкість траєкторій, свободу орієнтування робочого органу та можливість реалізації силового керування.

Обраний маніпулятор Franka Emika Panda відповідає сформульованим вимогам завдяки поєднанню широких діапазонів кутових переміщень, достатньої досяжності, наявності інтегрованих силомоментних датчиків і підтримки колаборативних режимів. Його кінематична схема та робоча зона забезпечують стабільну, керовану взаємодію м'якого Fin-Ray захвату з об'єктами в межах робочого простору над столом, що робить цю конструкцію раціональним та технічно обґрунтованим вибором для даного дослідження.

6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ “АДАПТИВНИЙ ГНУЧКИЙ МОДУЛЬ ЗАХВТУ”

6.1. Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту

Ідея стартап-проекту полягає у створенні модульного біоміметичного силіконового захвату типу Fin-Ray, що здатний автоматично адаптувати свою геометрію до форми об’єкта, забезпечуючи стабільний контакт та мінімізуючи ризик деформацій або пошкоджень. Запропонований модуль поєднує гнучкий силіконовий корпус на основі SKL-20 Platinum Silicone, композитне підсилення для підвищення стійкості до згинальних навантажень та сенсорний елемент FSR-400 для контролю зусилля.

Така конструкція забезпечує точне, делікатне та безпечне маніпулювання об’єктами у сферах, де традиційні жорсткі захвати демонструють недостатню універсальність: точне складання, медична робототехніка, сервісні роботи, інтеграція в роботизовані комплекси виробництва електроніки та лабораторні автоматизовані системи.

У таблиці 6.1 зображено зміст ідеї та можливі базові ринки, в межах яких треба шукати потенційних клієнтів.

Таблиця 6.1. - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка адаптивного силіконового захвату на основі Fin-Ray з сенсорним контролем тиску, композитним підсиленням та можливістю інтеграції у роботизовані системи.	1. Сервісні та лабораторні роботи	Безпечний контакт із крихкими об’єктами
	2. Виробництво електроніки	Швидка інтеграція у роботизовані системи
	3. Автоматизовані мікромонтажні лінії	Зниження витрат на переналаштування обладнання

Отже, ідея формує технологічний продукт з високим ступенем адаптивності та низькими ризиками пошкодження об'єктів, що критично для складання крихких деталей, харчової та сервісної робототехніки.

Для оцінювання конкурентоспроможності стартап-проєкту «Адаптивний гнучкий модуль захвату» було проведено порівняльний аналіз його ключових техніко-економічних характеристик із наявними на ринку рішеннями (mGrip, Festo DHEF, Robotiq). У таблиці 6.2 узагальнено результати такого зіставлення за основними параметрами: адаптивність до форми об'єкта, тип матеріалу, наявність сенсорного контролю, простота інтеграції, ціна виробництва, міцність конструкції та швидкість реакції. На основі порівняння для кожної характеристики визначено, чи є вона слабкою (W), нейтральною (N) чи сильною (S) стороною запропонованої ідеї.

Таблиця 6.2. — Визначення сильних, слабких і нейтральних характеристик ідеї

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	mGrip	Festo DHEF	Robotiq			
1	Адаптивність до форми об'єкта	Висока	Висока	Висока	Середня	—	—	S
2	Матеріал	Силікон з композитом	Силікон	Полімер	Механіка	—	—	S
3	Сенсорний контроль зусилля	Є (FSR-400)	Немає	Немає	Частково	—	—	S
4	Простота інтеграції	Висока	Середня	Низька	Висока	—	N	—
5	Ціна виробництва	Низька	Висока	Висока	Середня	W	—	—
6	Міцність конструкції	Середня	Висока	Висока	Висока	—	N	—
7	Швидкість реакції	Середня	Середня	Висока	Висока	W	—	—

Отже, ключові сильні сторони — сенсорність, низька собівартість, м'якість і адаптивність. Слабкою стороною є нижча міцність порівняно з промисловими жорсткими захватами, що компенсується специфікою застосування (крихкі об'єкти, делікатні операції).

Для оцінки практичної реалізовуваності стартап-проєкту було проведено технологічний аудит ключових елементів адаптивного гнучкого модуля захвату. Для кожної складової визначалися необхідні технології виготовлення, ступінь їх зрілості, наявність на ринку та реальна доступність для розробника. Окремо враховувалося, чи потребують ці технології модифікації або спеціального лабораторного відпрацювання. Узагальнені результати подано в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3. — Технологічна здійсненність ідеї

№	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Адаптивний силіконовий захват	Лиття силікону, 3D-друк форм	Є на ринку	Повністю доступні
2	Сенсорний модуль	Інтеграція FSR-400, пайка, плата з ATtiny85	Є на ринку	Доступні
3	Композитне армування ребер	Введення волокнистого підсилення	Частково потребує допрацювання	Доступна в R&D форматі
4	Механічний привід	Використання мікросервоприводів	Є на ринку	Доступні
5	Модуль інтеграції у маніпулятори	Стандартні монтажні інтерфейси	Є на ринку	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: Базовою технологією обрано лиття силіконових еластомерів у 3D-друковані форми, оскільки вона забезпечує точність геометрії Fin-Ray-структури, відтворюваність результатів та можливість швидкої модифікації конструкції. Інтеграція сенсорного модуля FSR-400 та мікроконтролера ATtiny85 також не потребує розробки нових виробничих процесів, оскільки спирається на стандартні методи пайки та складання малогабаритної електроніки. Механічний привід на основі мікросервоприводу доступний у широкому асортименті та легко інтегрується у конструкцію модуля.				

Усі базові технології доступні, що дозволяє реалізувати прототипи та організувати малосерійне виробництво. Деякі процеси (армування композитом) потребують оптимізації, але не ускладнюють виведення MVP.

Отже, ідея стартап-проекту «Адаптивний гнучкий модуль захвату» є технологічно здійсненою та ринково орієнтованою. Використані рішення ґрунтуються на доступних матеріалах та виробничих технологіях, що дозволяє розпочати виготовлення прототипів без значних інвестицій. Порівняння з ринковими аналогами підтверджує конкурентні переваги проекту — адаптивність, низьку собівартість, сенсорний контроль зусилля та універсальність інтеграції.

6.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для подальшого обґрунтування доцільності запуску стартап-проекту необхідно оцінити загальний стан цільового ринку м'якої робототехніки. На цьому етапі аналізуються кількість ключових гравців, орієнтовний обсяг продажів, динаміка розвитку сегмента, бар'єри входу та специфічні вимоги до сертифікації. Окремо враховується середній рівень рентабельності, що визначає інвестиційну привабливість проекту. Узагальнені результати такого аналізу наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4. — Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців	10–15 міжнародних компаній (Festo, Soft Robotics, Schunk, Robotiq тощо)
2	Загальний обсяг продаж	Ринок м'якої робототехніки $\approx$ 1,3 млрд дол. та щорічно зростає

3	Динаміка ринку	Зростає (високий попит на автоматизацію складання, електроніки, медпристроїв)
4	Наявність обмежень для входу	Середні: патенти, технологічні бар'єри
5	Специфічні вимоги до сертифікації	CE / ISO для промислових роботів;
6	Середня норма рентабельності	15–30% (характерно для high-tech hardware)

Отже, за аналізом даної таблиці можна сказати, ринок є зростаючим, прибутковим і достатньо відкритим для технологічних стартапів, за умови дотримання сертифікаційних вимог.

Було також проаналізовано профілі потенційних клієнтів стартап-проекту. У межах дослідження виділено основні потреби, які формують попит на адаптивний гнучкий модуль захвату, відповідні цільові аудиторії, їхні поведінкові особливості та ключові вимоги до продукту. Узагальнені результати наведено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 — Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Поведінкові відмінності	Вимоги споживачів
1	Безпечне та точне маніпулювання	Виробники роботизованих маніпуляторів	Орієнтація на точність, модульність	Надійність, адаптивність, простота інтеграції
2	Робота з крихкими об'єктами	Виробники електроніки	Висока делікатність, мінімум браку	Низький тиск захвату, сенсорний контроль
3	Автоматизація мікрооперацій	Індустрія точного складання	Швидкість, повторюваність	Стабільність захоплення, швидке переналаштування
4	Делікатний контакт з біоматеріалами	Медична робототехніка	Суворі сертифікація, безпечність	Гіпоалергенні матеріали, стерилізованість
5	М'яка взаємодія з об'єктами різної форми	Сервісні та лабораторні роботи	Гнучкість сценаріїв, універсальність	Адаптивність Fin-Ray, низька вага

Таким чином, продукт має кілька чітких сегментів: промисловість, електроніка, медична робототехніка, сервісні системи — що забезпечує широкий ринок без залежності від однієї галузі.

Для оцінювання стійкості стартап-проєкту до зовнішніх впливів було проаналізовано ключові загрози ринкового середовища. У таблиці 6.6 згруповано основні ризики, пов'язані з патентними обмеженнями, високою конкуренцією, можливою зміною цін на комплектуючі та залежністю від імпорتنих матеріалів. Для кожної загрози визначено передбачену реакцію компанії, що дозволяє сформулювати базові підходи до управління ризиками на етапі запуску продукту.

Таблиця 6.6 — Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Реакція компанії
1	Патентні обмеження	Наявність захищених технологій у Festo і Soft Robotics	Пошук власних конструктивних рішень, унікального матеріального складу
2	Висока конкуренція	Сильні світові виробники	Диференціація через сенсорику та низьку ціну
3	Можливе здорожчання компонентів	Ріст цін на електроніку	Можливість використання аналогів, локальних комплектуючих
4	Залежність від імпорتنих матеріалів	Сервомотори, силікон	Формування запасу + локальні замінники

З наведених даних видно, що більшість загроз мають передусім стратегічний характер і можуть бути пом'якшені за рахунок активної диференціації продукту, розвитку власних конструкторських рішень та диверсифікації постачальників. Своєчасне формування запасів критичних матеріалів і пошук локальних аналогів дають змогу зменшити залежність від коливань цін та імпорتنих поставок. Таким чином, за умови системного

моніторингу ринкової ситуації виявлені загрози не є критичними та не перешкоджають реалізації стартап-проєкту.

Для оцінювання перспектив зростання стартап-проєкту, окрім загроз, проаналізовано також можливості, які формує зовнішнє середовище. Розглядалися тенденції розвитку ринку робототехніки, зміни в підходах до безпечної взаємодії з об'єктами, поширення автоматизації складання, ситуація з локальною конкуренцією та запит на індивідуальні рішення. Узагальнення цих чинників подано в таблиці 6.7 «Фактори можливостей».

Таблиця 6.7 — Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Реакція компанії
1	Зростання ринку робототехніки	Потреба у гнучких захватах зростає щороку	Масштабування виробництва
2	Попит на безпечні захвати	Індустрії відмовляються від жорстких конструкцій	Акцент на Fin-Ray і сенсорику
3	Поширення автоматизації складання	Особливо в електроніці	Створення промислових версій модулів
4	Низька конкуренція в Україні	Відсутність місцевих аналогів	Участь у програмах індустриальних хабів
5	Потреба в кастомізації	Компанії шукають індивідуальні захвати	Модульна модель

Перелік виявлених можливостей демонструє, що ринкове середовище є радше сприятливим, ніж обмежувальним для запуску адаптивного гнучкого модуля захвату. Зростання ринку робототехніки й тренд на безпечні м'які захвати створюють основу для масштабування виробництва, а поширення автоматизації складання відкриває нішу для промислових версій модуля. Відсутність сильних локальних конкурентів в Україні та попит на кастомізовані рішення дають змогу сконцентруватися на модульності

продукту й активно використовувати інструменти партнерських програм та індустріальних хабів.

У таблиці 6.8 узагальнено основні його характеристики: тип і рівень конкуренції, галузеву специфіку, характер конкурентних переваг та інтенсивність боротьби, а також їхній вплив на ринкову поведінку стартап-проєкту.

Таблиця 6.8 — Аналіз конкурентного середовища

Особливість	Прояв	Вплив
Тип конкуренції	Монополістична: декілька сильних гравців + багато малих	Необхідність інновацій
Рівень боротьби	Міжнародний	Високі вимоги до якості
Галузевість	Внутрішньогалузева	Специфічні стандарти
Товарна конкуренція	Товарно-видова	Потрібна унікальна цінність
Характер переваг	Нецінова (якість, безпека)	Робити ставку на сенсорику
Інтенсивність	Висока	Постійні покращення продукту

Ринок м'яких роботизованих захватів характеризується високою інтенсивністю конкуренції та міжнародним рівнем боротьби, що зумовлює жорсткі вимоги до якості та інноваційності продукту. За таких умов для проєкту критично важливо підтримувати унікальність технічних рішень, робити акцент на сенсорних можливостях і постійно вдосконалювати конструкцію.

Для поглибленої оцінки конкурентного середовища стартап-проєкту застосовано модель «п'яти сил» М. Портера.

Таблиця 6.9 — Аналіз за моделлю 5 сил Портера

	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові	Festo, Soft Robotics, Schunk	Китайські виробники, 3D-printed grippers	Постачальники силікону та електроніки	Робототехнічні компанії	Жорсткі механічні захвати
Висновки	Висока інтенсивність	Середні бар'єри	Помірна сила	Високі вимоги	Замінники менш ефективні

Аналіз за моделлю п'яти сил М. Портера показує, що для стартап-проєкту ключовим чинником є висока інтенсивність прямої конкуренції з боку міжнародних виробників м'яких та колаборативних захватів, що вимагає постійних інновацій та підтримання технологічної унікальності продукту. Потенційні конкуренти, зокрема дешеві китайські виробники та 3D-друковані гріпери, формують середні бар'єри входу, однак їхній тиск може бути зменшений за рахунок якісного позиціонування та акценту на надійності й сенсориці.

Для виділення ключових ринкових переваг стартап-проєкту було проаналізовано, які саме властивості адаптивного гнучкого модуля захвату створюють додану цінність для споживача і відрізняють його від існуючих рішень. До переліку включено лише ті чинники, що суттєво впливають на вибір обладнання в галузях точного складання, виробництва електроніки та сервісної робототехніки. Узагальнені результати обґрунтування факторів конкурентоспроможності наведено в таблиці

Таблиця 6.10 — Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, що роблять фактор значущим для порівняння проєктів)
1	Адаптивність конструкції Fin-Ray-	Забезпечує автоматичне підлаштування форми захвату до об'єкта без складного переналаштування, що зменшує кількість спеціалізованих інструментів і скорочує час переналагодження лінії.
2	Сенсорний контроль зусилля	Наявність FSR-датчика дає змогу контролювати силу притискання в реальному часі, що критично для роботи з крихкими деталями та зменшення браку в процесах складання.
3	Низька собівартість виготовлення	Використання лиття силікону в 3D-друковані форми та доступних електронних компонентів дозволяє знизити витрати на виробництво і робить модуль привабливим для малих та середніх підприємств.
4	Простота інтеграції у роботизовані системи	Стандартизовані механічні інтерфейси та вбудований мікроконтролер ATtiny85 полегшують встановлення модуля на наявні маніпулятори без глибоких змін у системі керування.
5	Модульність і можливість кастомізації	Конструкція передбачає варіації числа пальців, розмірів, типів армування та сенсорики, що дозволяє адаптувати продукт під конкретні задачі замовника без повної переробки проєкту.

Для кількісної оцінки переваг стартап-проєкту кожен із виділених факторів конкурентоспроможності було проранжовано за шкалою від 1 до 20 балів, де вищі значення відповідають більшому внеску у ринковий успіх продукту. Далі отримані оцінки порівнювалися із середнім рівнем реалізації цих факторів у основних конкурентів (mGrip, Festo DHEF, інші м'які захвати). Результати подано в таблиці 6.11

Таблиця 6.11 — Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «АГЗ»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Адаптивність Fin-Ray-конструкції	18			+				
2	Сенсорний контроль зусилля	19		+					
3	Низька собівартість виготовлення	17			+				
4	Простота інтеграції у роботизовані системи	16				+			
5	Модульність і можливість кастомізації	15			+				

З наведених даних видно, що за більшістю ключових факторів конкурентоспроможності продукт має кращі позиції порівняно з типових ринковими аналогами. Найбільший розрив спостерігається в частині сенсорного контролю зусилля та адаптивності конструкції, де конкуренти помітно поступаються.

Таблиця 6.12 — Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

Сильні сторони: 1. Адаптивна Fin-Ray-конструкція, що підлаштовується під форму об'єкта без складних переналаштувань. 2. Сенсорний контроль зусилля на базі FSR-400, можливість налаштування «безпечного» тиску. 3. Низька собівартість виготовлення (лиття в 3D-форми, доступні електронні компоненти).	Слабкі сторони: 1. Низька міцність і вантажопідйомність порівняно з жорсткими металевими захватами. 2. Обмеження за робочими умовами через силікон (температура, агресивні середовища). Потреба в калібруванні та фільтрації сигналу датчика для стабільної роботи.
--	---

4. Модульність і кастомізація: варіації кількості пальців, розмірів, типів армування та сенсорики. 5. Легка інтеграція з існуючими маніпуляторами, мала маса модуля.	3. Необхідність навчання користувачів і демонстрацій через новизну технології. 4. Обмежений ресурс матеріалу за умов інтенсивних циклів деформації (старіння силікону).
Можливості: 1. Зростання ринку робототехніки та колаборативних роботів, підвищення попиту на м'які захвати. Тренд на безпечну взаємодію з крихкими об'єктами в електроніці, фармацевтиці, медтехніці. 2. Відсутність локальних аналогів в Україні, шанс зайняти нішу першого постачальника. 3. Участь у грантових програмах, індустріальних хабах, конкурсах інноваційних рішень. 4. Розширення лінійки: різні розміри та спеціалізовані модифікації модулів під окремі галузі.	Загрози: 1. Поява дешевих копій та 3D-друкованих альтернатив із нижчою ціною. 2. Патентні обмеження та можливі претензії з боку великих гравців ринку. 3. Коливання курсу та зростання цін на імпортовані матеріали й електроніку. 4. Посилення вимог до сертифікації в медичній і колаборативній робототехніці. 5. Економічна нестабільність, що ускладнює залучення інвестицій в апаратні стартапи.

SWOT-аналіз показує, що розробка має виражений набір сильних сторін, пов'язаних з адаптивністю Fin-Ray-структури, сенсорним контролем зусилля та відносно низькою собівартістю виготовлення. Сукупність цих факторів дозволяє позиціонувати модуль як технологічно відмінний від класичних жорстких захватів продукт, орієнтований на делікатні операції та швидку інтеграцію у наявні роботизовані системи.

Водночас проект стикається з низкою обмежень, пов'язаних із міцністю силіконових компонентів, необхідністю стабільної роботи сенсорики та ризиками, що впливають із патентного поля і залежності від імпортованих матеріалів. Однак зовнішні можливості — зростання ринку робототехніки, відсутність локальних аналогів, попит на безпечні м'які захвати — переважають і за умови правильно обраної стратегії дозволяють компенсувати виявлені загрози.

Таблиця 6.13 — Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів ринкової поведінки)	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу (акцент на адаптивності, сенсориці та низькій собівартості)	Висока	6–12 місяців
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями (гранти, партнерства, вихід у ніші з низькою конкуренцією)	Середня	12–18 місяців
3	Стратегія поетапного виходу з ринку у разі невдалого тестування або відсутності попиту	Низька	Залежить від обставин

З зазначених альтернатив доцільно обрати стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями, оскільки вона дозволяє використати зростання ринку робототехніки, відсутність локальних аналогів та підтримку інноваційних проєктів для подолання технологічних і фінансових обмежень.

Таким чином, проведений аналіз показує, що стартап-проєкт має сприятливі ринкові умови для запуску. Зростання ринку робототехніки, висока потреба у м'яких адаптивних захватах та відсутність локальних аналогів формують значний потенціал для комерціалізації. Конкуренція помірно висока, але унікальні характеристики продукту — сенсорний контроль зусилля, композитна міцність та гнучкість Fin-Ray — створюють конкурентну перевагу.

6.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту

Для визначення найбільш перспективних сегментів ринку було проведено аналіз профілю потенційних споживачів адаптивного гнучкого модуля

захвату. У процесі дослідження оцінювалися такі параметри, як готовність клієнтів приймати нове технологічне рішення, орієнтовний попит у межах сегменту, рівень конкурентного тиску та простота входу в конкретний ринковий напрямок. Результати аналізу наведено у таблиці 14.

Таблиця 6.14 — Вибір цільових груп для виходу на ринок

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит у межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Виробники роботизованих маніпуляторів	Висока – зацікавленість у нових модульних рішеннях	Високий, стабільне зростання ринку робототехніки	Висока, присутні глобальні виробники	Середня – потрібна технічна інтеграція
2	Індустрія точного складання	Дуже висока – гостра потреба у делікатних захватах	Високий, зростання автоматизації та мікроскладання	Середня – небагато м'яких рішень	Висока – швидка інтеграція
3	Виробництво електроніки	Висока – важлива мінімізація браку	Дуже високий, масові обсяги виробництва	Середня	Середня – вимоги до стабільності процесу
4	Сервісні та лабораторні роботи	Середня – залежить від сценаріїв використання	Середній	Низька	Висока – немає жорстких бар'єрів
5	Медична робототехніка	Середня – через регуляцію	Високий, особливо у біоманіпуляції	Висока – вимоги до сертифікації	Низька – регуляторні бар'єри

Результати аналізу свідчать, що найбільш перспективними для виходу на ринок є сегменти високоточної промислової робототехніки та виробництва електроніки. У цих галузях спостерігається стабільний попит на делікатні й адаптивні захвати.

На цьому етапі було проаналізовано стратегічні альтернативи виходу на ринок відповідно до ринкових умов та характеристик конкуренції. До уваги бралися можливі моделі охоплення ринку, рівень диференціації продукту та ключові конкурентні переваги. Таблиця нижче містить обґрунтований вибір базової стратегії.

Таблиця 6.15 — Вибір базової стратегії розвитку

	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Зосередження на нішевому технологічному ринку	Диференційований маркетинг	Адаптивність, сенсорність, низька собівартість	Стратегія диференціації
2	Компенсація слабких сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Концентрований маркетинг	Фокус на сегментах, де не критична висока вантажопідйомність (електроніка, мікрооперації), партнерства з інтеграторами, використання грантів та індустріальних хабів для доопрацювання технології	Стратегія фокусування
3	Розширення ринкових позицій через нові сегменти	Масовий маркетинг	Вихід у медичну та сервісну робототехніку, масштабування лінійки модулів, формування впізнаваного бренду та стандартизованих рішень для різних типів маніпуляторів	Стратегія зростання

Отже, стратегія диференціації є оптимальною, оскільки продукт має унікальні властивості — гнучкість Fin-Ray та сенсорний контроль зусилля. Такий підхід дозволяє сформувати конкурентну перевагу і закріпитися в сегменті високотехнологічних роботизованих систем.

У таблиці нижче сформовано основні стратегічні підходи, спрямовані на посилення ринкових позицій проєкту. Перед її складанням оцінювалися чинники конкурентоспроможності, ринкові загрози та можливості. Усі стратегії орієнтовані на підвищення стійкості на ринку висококонкурентних робототехнічних рішень.

Таблиця 6.17 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Частково. Продукт належить до відомої технології Fin-Ray, але є новим у поєднанні зі сенсорним контролем зусилля.	Компанія орієнтується на нових споживачів у точному складанні та електроніці, частково — на перехоплення клієнтів у виробників жорстких захватів.	Копіювання не передбачається; запозичуються лише загальні принципи м'якої адаптивної геометрії, натомість сенсорика та конструкція унікальні.	Підсилення унікальних характеристик та технологічна інновація

Проєкт не є повним першопрохідцем, однак його унікальна комбінація адаптивної конструкції та сенсорного контролю створює нову нішу серед м'яких роботизованих захватів. Стратегія не базується на копіюванні існуючих рішень, натомість зосереджена на підсиленні технологічних переваг та створенні доданої цінності для нових сегментів ринку.

Для визначення стратегії позиціонування стартап-проєкту було проаналізовано ключові очікування цільових сегментів, конкурентні переваги продукту та базову стратегію розвитку, визначену у попередньому підрозділі.

Таблиця 6.18. - Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію проєкту (три ключові)
	М'якість, безпечність, точний контроль зусилля, адаптивність до форми об'єкта	Стратегія диференціації	Адаптивна конструкція Fin-Ray; сенсорний контроль FSR-400; низька вага і безпечність силікону SKL-20, композитне підсилення	Якість, технологічність, безпечність

Обрані асоціації підкреслюють сильні сторони продукту та формують цілісний образ рішення, орієнтованого на точне та м'яке маніпулювання. Таке позиціонування забезпечує конкурентну впізнаваність та підтримує диференціацію стартапу в межах високотехнологічного ринку робототехніки.

Для формалізації стартап-проєкту «Адаптивний гнучкий модуль захвату» було побудовано структуру бізнес-моделі. Вона дає змогу системно описати ключові елементи проєкту: партнерів, основні дії та ресурси, ціннісну пропозицію, відносини з клієнтами, канали збуту, структуру витрат і потоки доходів. Такий підхід дозволяє узгодити технічну концепцію модуля з економічною логікою його комерціалізації та виявити «вузькі місця» ще на етапі планування.

Таблиця 6.19 – Структура бізнес-моделі стартап-проєкту

Назва блоку	Характеристика	Елементи	Основні питання
Ключові партнери	Партнери забезпечують ресурси, експертизу та доступ до ринку.	Виробники роботизованих маніпуляторів; інтегратори робототехнічних систем; постачальники силікону, композитів та електроніки; університетські лабораторії та R&D-центри; грантові фонди, інкубатори, індустріальні хаби.	Хто є нашими ключовими постачальниками й партнерами? Які ресурси або компетенції ми отримуємо від них? З ким варто будувати довгострокові відносини для масштабування?
Ключові дії	Основні процеси, необхідні для створення й розвитку продукту.	Проектування Fin-Ray-структур; моделювання і тести в CAD/CAE; виготовлення форм і лиття силікону; складання та калібрування сенсорного модуля; випробування захватів; підготовка технічної документації; маркетинг і робота з клієнтами.	Які дії є критичними для створення цінності? Що ми повинні робити постійно, щоб підтримувати якість і конкурентоспроможність продукту?
Ключові ресурси	Ресурси, що забезпечують функціонування бізнесу та виробництва.	Людські ресурси: інженер-конструктор, технолог, електронник, маркетолог; технічні ресурси: 3D-принтер, обладнання для лиття силікону, паяльні станції, тестові стенди, маніпулятори; інтелектуальні ресурси: CAD-моделі, ноу-хау, база тестів.	Які ресурси потрібні для створення й удосконалення продукту? Що є критичним: обладнання, команда, документація? Як забезпечити їхню доступність та оновлення?

Ціннісна пропозиція	Продукт вирішує ключові проблеми клієнтів і дає унікальну вигоду.	Адаптивний м'який модуль захвату для крихких об'єктів; сенсорний контроль зусилля; низька маса й собівартість; проста інтеграція у стандартні маніпулятори; можливість кастомізації під задачі конкретної лінії або клієнта.	Яку проблему клієнта ми розв'язуємо? Чому він обирає наш модуль, а не жорсткий захват або імпортований аналог? У чому полягає унікальність нашої пропозиції?
Сегменти клієнтів	Групи споживачів, для яких створюється продукт.	Виробники роботизованих маніпуляторів; інтегратори роботизованих ліній; підприємства з виробництва електроніки й мікромеханіки; індустрія точного складання; лабораторії та сервісні роботи; R&D-центри м'якої робототехніки.	Для кого ми створюємо цінність у першу чергу? Які сегменти варто обслуговувати на старті, а які — на етапі масштабування? Які вимоги вони висувають до ціни й сервісу?
Канали збуту	Способи доставки продукту та інформації до клієнта.	Прямі B2B-продажі виробникам і інтеграторам; участь у виставках, хакатонах, галузевих подіях; демонстраційні проекти з університетами та лабораторіями; сайт і професійні соцмережі (LinkedIn тощо); партнерські програми з постачальниками.	Через які канали клієнти дізнаються про продукт і отримують його? Які канали є найбільш ефективними та економічно доцільними на ранніх етапах розвитку стартапу?

Відносини з клієнтами	Формати взаємодії до, під час і після продажу.	Попередні технічні консультації; спільне проєктування конфігурації модуля; навчання персоналу; онлайн-підтримка; оновлення документації; сервісні огляди; допомога при інтеграції в лінії та оптимізації режимів роботи захвату.	Як ми утримуємо клієнтів і підвищуємо їхню лояльність? Який рівень сервісу очікує цільова аудиторія? Що робимо, щоб клієнт повертався з новими замовленнями?
Структура витрат	Основні витрати, необхідні для створення, підтримки й розвитку продукту.	R&D (проєктування, моделювання, випробування); матеріали (силікон, композити, електроніка, серви); виробниче обладнання й інструмент; зарплати команди; маркетинг і участь у заходах; сервісна підтримка та логістика.	Які статті витрат є найбільш значущими? Де ми можемо оптимізувати витрати без втрати якості продукту? Який обсяг постійних і змінних витрат має бізнес?
Потоки доходів	Джерела надходження коштів від клієнтів.	Продаж окремих модулів захвату; продаж невеликих партій для інтеграторів; інженерні послуги з кастомізації та інтеграції; можливі ліцензійні угоди на використання конструкції; сервісні контракти на супровід і модернізацію рішень.	Як ми заробляємо гроші? Які моделі монетизації (разові продажі, сервіс, ліцензування) є для нас пріоритетними? Який внесок кожного джерела в загальний дохід?

Структура бізнес-моделі демонструє, що стартап-проєкт має узгоджену логіку створення та комерціалізації продукту: від залучення ключових партнерів і ресурсів до формування ціннісної пропозиції та каналів збуту. Чітко окреслені сегменти клієнтів і формати взаємодії з ними доповнюються

прозорою структурою витрат і потенційних потоків доходів, що дає змогу оцінити економічну життєздатність проєкту.

На цьому етапі формується маркетингова концепція товару, що визначає ключові вигоди, які отримає споживач, та переваги продукту над існуючими аналогами. Для цього аналізуються базові потреби цільової аудиторії та відповідність їм функціональних можливостей продукту.

Таблиця 6.20. - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Делікатне маніпулювання об'єктами	Зменшення ризику пошкодження крихких деталей	М'який силікон SKL-20 та Fin-Ray адаптивність дають нижчий тиск, ніж механічні аналоги
2	Точність і стабільність захвату	Контроль сили стискування та зворотний зв'язок	Вбудована сенсорика FSR-400 — відсутня у більшості м'яких захватів
3	Універсальність і модульність	Робота з об'єктами різної геометрії	Гнучка геометрія Fin-Ray + стандартизовані інтерфейси
4	Зниження виробничих витрат	Дешевше переналаштування і менше браку	Низька собівартість виготовлення + швидке лиття
5	Інтеграція роботизованих систем в	Просте підключення та керування	Мікроконтролер ATtiny85 та універсальні монтажні кріплення

Маркетингова концепція підкреслює ключові переваги продукту: м'якість, адаптивність і сенсорний контроль. Завдяки цим властивостям модуль забезпечує унікальну цінність у сферах точного складання та роботизації, де важливо уникати пошкодження об'єктів.

Трирівнева модель товару дає змогу комплексно оцінити продукт: від базового призначення до фізичних характеристик та підкріплювальних елементів, що формують цілісну пропозицію для ринку. Цей підхід дозволяє структуровано визначити споживчу цінність та окреслити особливості його реального й сервісного виконання.

Таблиця 6.21. - Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Забезпечення делікатного та безпечного захвату об'єктів різної форми з мінімальним тиском і можливістю адаптивної деформації для зменшення браку під час роботизованого складання.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Матеріал SKL-20 Platinum Silicone — висока еластичність, біосумісність, стабільність форми.	М	Тл
	2. Адаптивна Fin-Ray-конструкція — автоматичне підлаштування під форму об'єкта.	Нм	Тх
	3. Сенсорний контроль зусилля (FSR-400) — вимірювання сили стискання в реальному часі.	М	Тх

	4. Мікроконтролер ATtiny85 — локальне керування, обробка сигналів сенсора.	М	Тх
	5. Стандартизовані монтажні інтерфейси — можливість інтеграції в типові маніпулятори.	Нм	Ор
	6. Низька маса та собівартість модуля.	Нм	Е
	Якість: відповідність внутрішнім технічним вимогам до сили захвату, повторюваності деформації, ресурсу циклів; випробування на стенді з навантаженнями.		
	Пакування: індивідуальний модуль у захисному боксі з технічним паспортом та інструкцією з інтеграції.		
	Марка: Адаптивний гнучкий модуль захвату		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: технічна документація, САД-моделі, інструкції з інтеграції, рекомендації щодо калібрування сенсора		
	Після продажу: технічна підтримка, заміна витратних матеріалів, консультації з інтеграції в роботизовані системи.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Комбінація матеріалу SKL-20 і композитного армування, можливість патентування адаптивної структури та сенсорного модуля.			

Опис трирівневої моделі товару показує, що адаптивний гнучкий модуль захвату має цілісну структуру як з погляду функціонального призначення, так

і з позиції реального виконання та сервісного супроводу. На першому рівні чітко сформульовано основну цінність — делікатний і безпечний захват об'єктів складної форми, на другому — конкретизовано ключові технічні параметри, матеріали та конструктивні рішення, що забезпечують досягнення цієї цінності. Третій рівень підкріплення, який включає демонстрацію, технічні консультації та післяпродажну підтримку, підвищує привабливість продукту для промислових клієнтів і створює основу для довгострокової співпраці.

Для подальшого обґрунтування цінової політики стартап-проекту необхідно визначити межі встановлення ціни на адаптивний гнучкий модуль захвату з урахуванням вартості товарів-замінників, імпорتنих аналогів та платоспроможності цільових споживачів.

Таблиця 6.22. – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники (жорсткі захвати)	Рівень цін на товари-аналоги (імпортні м'які захвати)	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
1	3 000–6 000 грн за модуль	35 000–80 000 грн за модуль	Високий (промислові підприємства, інтегратори)	2 000–5 000 грн за модуль

Отримані межі свідчать, що запропонована ціна на продукт суттєво нижча за вартість закордонних м'яких аналогів і знаходиться в діапазоні або нижче за ціни жорстких промислових захватів. Це дозволяє позиціонувати продукт як доступне, але технологічно просунуте рішення для підприємств з високою платоспроможністю. Такий рівень цін створює резерв для покриття витрат і

формування прибутку, одночасно залишаючись привабливим для цільових клієнтів.

Для успішного виведення адаптивного гнучкого модуля захвату на ринок необхідно врахувати особливості закупівельної поведінки промислових клієнтів та інтеграторів роботизованих систем. Система збуту має забезпечувати не лише постачання обладнання, а й технічний супровід, демонстрацію можливостей та адаптацію рішення під конкретні виробничі умови. Узагальнений варіант формування каналів збуту наведено в таблиці 6.23

Таблиця 6.23. – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Закупівлі за довгостроковими контрактами (серійні поставки для виробничих ліній)	Надання технічної підтримки, консультування щодо інтеграції, оперативне постачання запасних модулів	Прямий канал	Прямий збут виробникам маніпуляторів та інтеграторам роботизованих систем
2	Необхідність попередньої демонстрації роботи захвату	Проведення презентацій, стендових випробувань, надання демо-зразків	Однорівневий канал	Збут через офіційних представників / партнерів з шоурумами та тестовими стендами

3	Індивідуальні проекти та кастомізація під специфічні задачі клієнта	Адаптація конструкції та сенсорики, розробка спеціальних конфігурацій, спільне проєктування	Прямий канал	Прямий збут із залученням технічних консультантів та інженерів з боку стартапу
---	---	---	--------------	--

Запропонована система збуту поєднує прямі продажі стратегічним клієнтам із використанням мережі партнерів та демонстраційних майданчиків.

Узагальнений варіант формування каналів збуту наведено в таблиці 6.24.

Таблиця 6.24. – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Клієнти шукають рішення для делікатного захвату та зниження браку	Галузеві виставки, форуми з робототехніки, технічні конференції	Безпечність, адаптивність Fin-Ray, зменшення пошкоджень виробів	Показати, як модуль вирішує проблему крихких об'єктів у складанні	Демонстрація кейсів «до/після» з реального виробництва, відео роботи захвату
2	Очікують простої інтеграції в існуючі роботизовані системи	Офіційний вебсайт, професійні журнали, платформи для інженерів	Простота інтеграції, сумісність із популярними маніпуляторами	Пояснити, що модуль легко підключається й не потребує складної переробки системи	Матеріали з прикладами схем підключення, огляди «plug-and-play» рішень, порівняння з традиційними захватами

3	Потребують індивідуального технічного супроводу та кастомізації	Персональні презентації, онлайн-зустрічі, персоналізовані листи	Модульність, можливість кастомізації, інженерний супровід	Показати готовність адаптувати продукт під конкретні задачі клієнта	Інфографіка з варіантами конфігурацій, пропозиція безкоштовної інженерної консультації та розрахунку індивідуального рішення
---	---	---	---	---	--

Запропонована концепція маркетингових комунікацій орієнтується на технічно підготовлену аудиторію, для якої важливі реальні приклади роботи, зрозумілі схеми інтеграції та можливість отримати індивідуальні інженерні рішення. Поєднання галузевих заходів, професійних медіа та персоналізованих контактів дозволяє одночасно формувати впізнаваність бренду і поглиблювати взаємодію з ключовими замовниками. Акцент на безпечності, адаптивності та кастомізації підтримує обрану стратегію диференціації продукту на ринку м'яких роботизованих захватів.

Висновок до підрозділу: Узагальнюючи результати підрозділу 6.3, можна зазначити, що для стартап-проєкту «Адаптивний гнучкий модуль захвату» сформовано цілісну ринкову стратегію, засновану на диференціації продукту та фокусі на сегментах високоточної промислової робототехніки й виробництва електроніки. Визначено оптимальну цінову нішу, яка поєднує доступність для платоспроможних промислових клієнтів із можливістю формування достатнього рівня прибутковості, а також обґрунтовано використання комбінованої системи збуту з прямими продажами та партнерськими каналами. Розроблена бізнес-модель і концепція маркетингових комунікацій демонструють узгодженість технічних характеристик модуля, його ціннісної пропозиції й обраних інструментів просування, що підвищує ймовірність успішної комерціалізації продукту на глобальному ринку м'якої робототехніки.

6.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності

Оскільки, стартап-проект «Адаптивний гнучкий модуль захвату» передбачає створення модульного біоміметичного силіконового захвату типу Fin-Ray з композитним підсиленням та інтегрованим сенсором сили FSR-400, що може вбудовуватись у роботизовані системи для делікатного маніпулювання крихкими об'єктами. Для реалізації такої технологічно складної розробки потрібна команда з чітко розподіленими ролями, яка поєднує інженерну, технологічну та бізнес-експертизу.

Таблиця 6.25. – Склад команди стартап-проекту

Посада	Обов'язки
Керівник проекту (CEO)	Загальне стратегічне управління стартапом; планування етапів розробки продукту; комунікація з інвесторами та партнерами.
Інженер-конструктор модуля захвату	Розробка CAD-моделей Fin-Ray-захвату; оптимізація геометрії та реберної структури; підготовка конструкторської документації для виготовлення форм і дослідних зразків; взаємодія з технологом щодо придатності конструкції до лиття.
Інженер-матеріалознавець / спеціаліст композитів з	Вибір та валідація матеріалів; підбір композитного армування
Інженер-електронік та вбудованих систем	Проектування схеми керування, розробка електроніки.
Інженер з програмного забезпечення та інтеграції	Розробка прошивки для керування сервоприводом і збору даних із сенсора; створення програмних інтерфейсів для інтеграції модуля захвату в роботизовані комплекси Franka Emika Panda.

Технолог виробництва	Організація процесу лиття силікону в 3D-друковані форми; розробка техпроцесів під дрібносерійне та серійне виготовлення.
Фахівець з маркетингу та бізнес-розвитку	Аналіз ринкових сегментів; формування ціннісної пропозиції; розробка каналів збуту й моделі ціноутворення.

Сформована таким чином команда забезпечує повний цикл реалізації стартап-проекту – від науково-технічної розробки м'якого композитного захвату до його промислового впровадження та виходу на цільові ринки.

Календарний графік реалізації стартапу дозволяє спланувати послідовність етапів розробки адаптивного гнучкого модуля захвату та контролювати строки виконання ключових завдань.

Таблиця 6.26. –Календарний графік реалізації стартап-проекту

№	Етап	Тривалість	Термін виконання
1	Розробка бізнес-моделі стартапу «Адаптивний гнучкий модуль захвату»	1 місяць	01.01.2026– 31.01.2026
2	Розробка MVP адаптивного гнучкого модуля захвату	3 місяці	01.02.2026– 30.04.2026
3	Тестування та доопрацювання MVP на реальних сценаріях роботи	2 місяці	01.05.2026– 30.06.2026
4	Розробка маркетингової кампанії та підготовка каналів збуту	2 місяці	01.07.2026– 31.08.2026
5	Запуск продукту на ринку та збір перших відгуків користувачів	1 місяць	01.09.2026– 30.09.2026

Запропонований графік забезпечує логічний перехід від формування бізнес-моделі до виходу продукту на ринок, що дозволяє уникнути затримок і підтримувати узгодженість між етапами реалізації проекту.

Розробимо, приблизний мінімальний кошторис проекту

Таблиця 6.26. – Кошторис витрат стартап-проєкту

Стаття витрат	Сума, \$
Розробка конструкції та виготовлення прототипів	3500
Розробка електроніки, сенсорики та прошивки	2000
Інтеграція з роботизованими системами та ПЗ	1500
Тестування та доопрацювання	1000
Маркетингова кампанія та промо-матеріали	1200
Адміністративні витрати (реєстрація, юридичні послуги тощо)	800
Разом	10000

Отже, поданий кошторис дозволяє оцінити економічну доцільність реалізації проєкту та спланувати раціональне використання фінансових ресурсів.

Також, цьому підрозділі побудовано бізнес-модель стартап-проєкту «Адаптивний гнучкий модуль захвату» у форматі Canvas. Вона узагальнює ключові елементи продукту: ціннісну пропозицію, сегменти споживачів, ключових партнерів і ресурси, канали збуту, а також структуру витрат і потоків доходів. Така візуалізація дає змогу системно оцінити життєздатність проєкту, узгодити технічні параметри розробки з реальними ринковими потребами та визначити пріоритетні напрями подальшого розвитку.

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Ціннісна пропозиція	Взаємовідносини з клієнтами	Сегменти споживачів
Постачальники силікону та композитів для лиття (SKL-20 тощо). Постачальники сенсорів (FSR-датчики), сервомоторів, мікроконтролерів та електронних компонентів. Партнери з 3D-друку та виготовлення форм, дрібносерійні виробничі майстерні. Інтегратори робототехнічних систем та промислової автоматизації для пілотних проектів. Університети, науково-дослідні лабораторії, навчальні центри робототехніки.	R&D гнучкого Fin-Ray захвату: проектування геометрії, вибір матеріалів та схем армування. Механічне моделювання та симуляції в SolidWorks, оптимізація конструкції. Підготовка технічної документації, навчальних матеріалів і рекомендацій з інтеграції в роботизовані лінії. Маркетинг і продажі: пошук пілотних клієнтів, участь у виставках, демонстрації рішень.	Модульний гнучкий силіконовий захват Fin-Ray, що автоматично адаптується до форми об'єкта без переналаштування. Делікатне захоплення крихких, м'яких та нестандартних виробів із зменшенням браку та пошкоджень на лінії. Безпечна робота поруч з людиною та сумісність з колаборативними маніпуляторами. Вбудований датчик тиску і готові алгоритми обмеження зусилля, що забезпечують стабільну якість процесу. Стандартизовані кріплення і електричні інтерфейси для швидкого дооснащення вже встановлених роботів. Можливість кастомізації форми пальців, матеріалу та ступеня армування під специфіку галузі (харчова, агро, логістика, лабораторії).	Персональний супровід перших пілотних впроваджень та технічні консультації інженерів клієнта. Спільні дослідницько-конструкторські проекти з адаптації захвату під конкретні задачі. Онлайн-підтримка: база знань, керівництва з інтеграції, приклади коду для мікроконтролерів. Навчальні воркшопи та тренінги для університетів і виробничих команд. Післяпродажний сервіс: оновлення прошивки, заміна модулів, рекомендації з обслуговування.	B2B: системні інтегратори робототехнічних комплексів та виробничої автоматизації. B2B: підприємства харчової, аграрної, фармацевтичної та електронної промисловості (лінії пакування, сортування, комплектації). Логістичні та e-commerce центри, де потрібно м'яке автоматизоване сортування товарів. Університети, інженерні школи та R&D-лабораторії, що розвивають напрям м'якої робототехніки.
	Ключові ресурси Технологія виготовлення: форми для лиття, налаштований процес роботи із силіконовими композитами. Електронна платформа керування: схема, друкована плата, прошивка тестового зразка. Команда: конструктори, матеріалознавці, фахівці з embedded-систем, інженери з автоматизації та продажів. Виробниче обладнання: 3D-принтери, обладнання для лиття силікону, вимірювальна й випробувальна база.		Канали збуту Прямі B2B-продажі через особисті контакти, галузеві виставки, конференції та демо-дні. Партнерські канали через інтеграторів промислових роботів та дистриб'юторів комплексуючих. Власний веб-сайт, технічний блог, професійні соцмережі (LinkedIn тощо) для генерації лідів.	
Структура витрат R&D-витрати: оплата роботи інженерів, симуляції в SolidWorks, тестові серії силіконових захватів. Витрати на матеріали та комплектуючі: силіконові композити, армувальні матеріали, сенсорні, електроніка, 3D-друку форм. Виробничі витрати: збірка модулів, контроль якості, упаковка і логістика. Заробітна плата команди, адміністративні та операційні витрати (оренда, обладнання, ПЗ). Витрати на сертифікацію та лабораторні випробування для окремих ринків. Маркетинг і продажі: участь у виставках, рекламні матеріали, підтримка сайту та демонстраційних стендів.			Потоки доходів Продаж стандартних модулів гнучкого захвату для інтеграції в роботизовані системи. Доходи від кастомних проектів: проектування спеціальних пальців, матеріалів, кріплень та інтеграції. Сервісні та підтримуючі контракти (оновлення прошивки, технічний супровід, розширені гарантії). Потенційні ліцензійні платежі за використання конструкції захвату та технології армування іншими виробниками на пізніших етапах розвитку проекту.	

Рисунок 6.1. – Бізнес-модель Canvas

Запропонована бізнес-модель показує, що головна цінність розробки полягає у можливості делікатної автоматизації операцій маніпулювання для промислових, логістичних та освітніх користувачів. Аналіз структури витрат і потенційних джерел доходів підтверджує доцільність поєднання продажу стандартних модулів захвату з кастомними послугами інтеграції та сервісного супроводу. Таким чином, сформована Canvas-модель підтверджує комерційну привабливість стартап-проекту та окреслює орієнтири для його масштабування.

У підрозділі 6.4 обґрунтовано бізнес-модель стартап-проекту та проведено базове оцінювання його економічної ефективності. Показано, що реалізація біоміметичного силіконового захвату Fin-Ray з композитним підсиленням і сенсорним модулем потребує мультидисциплінарної команди. Орієнтовний кошторис у розмірі 10 000 \$ структурує витрати за ключовими статтями й визначає мінімально необхідний обсяг фінансування, що створює підґрунтя для подальших розрахунків показників рентабельності, періоду окупності та інвестиційної привабливості стартапу.

Висновки до розділу

У розділі 6 було послідовно показано, що стартап-проект «Адаптивний гнучкий модуль захвату» має не лише цікаву технічну ідею, а й реальні шанси на практичну реалізацію та вихід на ринок. На основі аналізу концепції продемонстровано, що біоміметичний силіконовий захват типу Fin-Ray з композитним підсиленням та сенсорним модулем FSR-400 дійсно вирішує конкретну прикладну проблему — делікатне та безпечне маніпулювання крихкими об'єктами з можливістю інтеграції у вже існуючі роботизовані системи. Технологічний аудит підтвердив, що ключові елементи проекту спираються на доступні й добре відпрацьовані технології: лиття силікону в 3D-друковані форми, використання стандартних сенсорів і мікросервоприводів, застосування типових інтерфейсів кріплення. Це дає підстави стверджувати, що перехід від лабораторного прототипу до малосерійного виробництва є реалістичним і не вимагає надмірних інвестицій у складне спеціалізоване обладнання.

Аналіз ринкового середовища показав, що зовнішні умови в цілому сприятливі для запуску такого продукту. Ринок м'якої робототехніки демонструє стабільне зростання та формує помітний попит на адаптивні захвати в галузях електроніки, точного складання, сервісної та медичної робототехніки. Хоча проєкт стикається з конкуренцією з боку міжнародних гравців і патентними обмеженнями, відсутність локальних аналогів в Україні, зростання попиту на м'які захвати та тренд на безпечну взаємодію з об'єктами створюють реальний простір для його розвитку.

Бізнес-модель стартап-проекту показала, що технічна концепція модуля логічно пов'язана зі структурою витрат та потенційними потоками доходів. Запропонований склад мультидисциплінарної команди охоплює всі критичні ролі — від конструкторських і матеріалознавчих завдань до електроніки, програмного забезпечення, виробництва та маркетингу. У сукупності

результати розділу 6 дають підстави зробити висновок, що стартап-проект «Адаптивний гнучкий модуль захвату» є технологічно здійсненим, ринково обґрунтованим та економічно перспективним, а розроблена бізнес-модель і стратегія розвитку створюють реальні передумови для його успішної комерціалізації в сегменті м'яких роботизованих захватів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Отже, у магістерській роботі виконано комплексне дослідження та розроблення адаптивного гнучкого модуля захвату типу Fin-Ray для роботизованих маніпуляторів, у якому поєднано аналіз існуючих технічних рішень, конструктивно-матеріалознавче проєктування, синтез системи керування й опрацювання бізнес-моделі стартап-проєкту.

У роботі розроблено геометричну модель Fin-Ray-пальця з урахуванням кількості та кроку ребер, товщини несних елементів і варіантів зміни локальної жорсткості. На підставі аналізу механічних і технологічних характеристик силіконів обґрунтовано вибір матеріалу SKL-20 Platinum Silicone як базового для виготовлення робочої частини захвату. Досліджено кілька схем армування, зокрема потовщення граней, інтеграцію вуглецевої тканини у зовнішню поверхню та її розміщення в зоні ребер-перетинок. Порівняння показало, що варіант із вуглецевою тканиною в ребрах забезпечує найкращий компроміс між підвищенням несної здатності та збереженням м'якого, контрольованого деформування при контакті з об'єктом. Окремо виконано аналіз кінематичних структур промислових маніпуляторів і показано доцільність використання колаборативних шестикоординатних роботів зі шарнірною структурою, які забезпечують достатній робочий простір, плавність рухів і придатні до реалізації силового керування в парі з м'яким захватом.

З метою реалізації керованого захоплення розроблено приводну частину захвату на основі мікросервопривода та відповідної передавальної ланки, а також створено електронний модуль керування на базі мікроконтролера ATtiny85 і трьох FSR-датчиків сили. У середовищі CAD спроектовано друковану плату, що містить вузли живлення, інтерфейс для програмування, роз'єми підключення сенсорів і сервопривода. На рівні програмного забезпечення реалізовано алгоритм, який здійснює опитування кнопки з

програмним придушенням дрібездгу, плавне керування сервоприводом за допомогою ШІМ-сигналу та зупинку руху при досягненні порогового значення сили на всіх FSR-датчиках. Моделювання роботи плати в середовищі Tinkercad та виготовлення серії експериментальних зразків силіконового пальця підтвердили працездатність запропонованих технічних рішень: отримано передбачуваний характер деформації, адекватну реакцію системи на зміну навантаження та можливість обмеження зусилля стискання для запобігання пошкодженню об'єкта.

Список використаної літератури

1. Sholl N., Mohseni K. High-stretch, tendon-driven, fiber-reinforced membrane soft actuators with multiple active degrees of freedom. Communications Engineering, 2024, 3, Article 25.
2. Dzedzickis A., Petronienė J.J., Petkevičius S., Bučinskas V. Soft Grippers in Robotics: Progress of Last 10 Years. Machines, 2024, 12(12), 887.
3. Kladovasilakis N., Sideridis P., Tzetzis D., Piliounis K., Kostavelis I., Tzovaras D. Design and Development of a Multi-Functional Bioinspired Soft Robotic Actuator via Additive Manufacturing. Biomimetics, 2022, 7(3), 105.
4. Shan X. та ін. Modeling and analysis of soft robotic fingers using the Fin Ray effect. The International Journal of Robotics Research. 2020.
5. Bliach O., Heidenreich L.-K., Fang Y., Zhang Y., Hull A., Zhou Y., Olivero A., McGhee S., Bay L., Sorour A., Krooß P., Agris J., Yiu L.-M., Kienle A., Filippeschi C., Mazzolai B. Fabrication of Soft Robotics by Additive Manufacturing: From Materials to Applications. Chemical Reviews, 2025, 125(16), 7275–7320.
6. Srinivas G. L., Javed A., Faller L. M. Versatile 3D-printed fin-ray effect soft robotic fingers: lightweight optimization and performance analysis. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46, Article 382.
7. Chai Y., Qin Y., Xu Z., Zheng X., Jia H. Advances in Fabric-Based Pneumatic Soft Actuators for Flexible Robotics: Design and Applications. Sensors, 2025, 25(12), 3665.
8. Liu Y., Sun D. (ред.). Biologically Inspired Robotics. Boca Raton: CRC Press, 2011. 340 с.
9. Павленко І. І., Годунко М. О. Захватні пристрої роботів : монографія. Кропивницький: ТОВ «КОД», 2020. 386 с.
10. Віленський В. О. Полімери: синтез, модифікація, дослідження : навч. посібник. Житомир: ЖДУ ім. І. Франка, 2024. 348 с.
11. Копань В. С. Композиційні матеріали : навч. посібник. Київ: Пульсари, 2004. 200 с.

12. FSR 400. Datasheet
13. Rus D., Tolley M. T. Design, fabrication and control of soft robots // Nature. 2015. Vol. 521. P. 467–475.
14. Universal Robots A/S. UR5e Collaborative Robot: Product Fact Sheet. Odense, 2021.
15. Shintake J., Cacucciolo V., Floreano D., Shea H. Soft robotic grippers // Advanced Materials. – 2018. – Vol. 30, No. 29. – Article 1707035.
16. Dassault Systèmes SolidWorks Corp. SOLIDWORKS Simulation. Training Course 2023. Waltham, MA, 2022.
17. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / за заг. ред. О. А. Гавриша ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
18. Композиційні матеріали: конспект лекцій. Навчальний матеріал з дисципліни «Композиційні матеріали» для інженерних спеціальностей. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка».
19. Trivedi D., Rahn C. D., Kier W. M., Walker I. D. Soft robotics: biological inspiration, state of the art, and future research // Applied Bionics and Biomechanics. – 2008. – Vol. 5, No. 3. – P. 99–117.
20. Кравець В. О., Кравець О. М., Фролов В. К. та ін. Використання морфологічних методів при проектуванні захватних пристроїв // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2024. – № 4(91). – Секція «Інженерні науки».
21. Ковальов Ю. А., Кошель С. О., Манойленко О. П. Проектування промислових роботів та маніпуляторів : навч. посіб. – Київ : Центр учбової літератури, 2020.
22. Поліщук М. М., Ткач М. М. Робототехнічні системи: проектування і моделювання : навчальний посібник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 112 с.

23. Колосов О. Є. Композиційні та наноматеріали : навчальний посібник [електронне видання]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 224 с.
24. Геворкян Є. С. та ін. Нові матеріали та технології їх отримання : підручник. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – 360 с.
25. Свищ О. І. М'які роботизовані захвати Fin-Ray на основі силіконових композитів для колаборативної робототехніки – Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні: матеріали ХХІ наук.-практ. конф. (Київ, 2024 р.). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.
26. Долиненко В.В. Роботизована система неруйнівного вихрострумового контролю виробів зі складною геометрією / В.В. Долиненко, Є.В. Шаповалов, Т.Г. Скуба, В.О. Коляда, Ю.В. Куц, Р.М. Галаган, В.В. Карпінський // Автоматическая сварка. – Київ. – 2017. - № 5-6 (764). – С. 60-67.
27. Куц Ю.В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с.
28. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
29. Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.
30. Using the RedPitaya platform in automated eddy current testing / Levchenko O., Aleksiev A., Kuts Y., Lysenko I. // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 4. – 194-201 pp.
31. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.