

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

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

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Проектування та структурний аналіз

роботизованої руки для подачі металевого листа в різальний верстат

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи КІТПВм-22-1

Матюшенко В. К.

Спеціальності 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютерно-  
інтегровані технологічні процеси і  
виробництва

Керівник проф. Косенко В. В.

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

\_\_\_\_\_ (підпис)

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

2024р.

Я, Матюшенко Владислав Костянтинович, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

19.01.2024



Матюшенко В. К.

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології \_\_\_\_\_  
Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_

« 01 » вересня 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Матюшенко Владиславу Костянтиновичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Проектування та структурний аналіз роботизованої руки для подачі металевого листа в різальний верстат» \_\_\_\_\_

Затверджена наказом по університету від 03.11.2023 р. № 1287 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 27.01.2023 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи

3.1 Машина для стрижки розташована близько до штабеля, а напрямок подачі в машині для стрижки перпендикулярний напрямку штабеля; \_\_\_\_\_

3.2 Робот має систему поворотних шарнірів, які можуть варіюватися від двох до десяти шарнірів і механізовані серводвигунами; \_\_\_\_\_

3.3 Транспортування листів в цьому процесі здійснюється за допомогою рами з присосками, з'єднаних з транспортерною стрічкою \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ. Визначення мети, об'єкту і предмету дослідження; 4.2 Проектування конструкції; 4.3 Визначення матеріалів; 4.4 Моделювання та аналіз; 4.5 Аналітична модель; 4.6 Результати та обговорення; 4.6 Висновки. \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) – 20 с. формату А4

---

6. Консультанти розділів роботи

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Визначення мети, об'єкту і предмету дослідження	01.09-10.09.2023	викон.
2	Аналіз матеріальної бази, технічного та методичного забезпечення	10.09-20.09.2023	викон.
3	Аналіз предметної області	20.09-05.10.2023	викон.
4	Проектування конструкції	05.10-20.10.2023	викон.
5	Матеріали	20.10-01.12.2023	викон.
6	Моделювання та аналіз	01.12-10.12.2023	викон.
7	Аналітична модель	10.12-16.12.2023	викон.
8	Результати та обговорення	16.12-21.12.2023	викон.
9	Резюме та висновки	21.12-31.12.2023	викон.
10	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	10.01.2024	викон.
11	Оформлення пояснювальної записки	12.01.2024	викон.
12	Подання роботи на рецензію	18.01.2024	викон.
13	Подання роботи на підпис зав. кафедри	20.01.2024	викон.
14	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	26.01.2024	викон.

Дата видачі завдання 01.09.2023 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Матюшенко В. К.

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Косенко В. В.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 83 с., 39 рис., 3 табл., 11 джерел.

РОБОТИЗОВАНИЙ МАНІПУЛЯТОР, РОБОТИЗОВАНА РУКА,  
РІЖУЧІ ЛЕЗА, AUTODESK-INVENTOR 2017, ПРИСОСКИ.

Об'єкт дослідження – проектування та структурний аналіз роботизованої руки для подачі металевого листа в різальний верстат.

Предмет дослідження – роботизований маніпулятор, який використовується для перенесення аркуша.

Мета роботи – аналіз та проектування нової моделі роботизованого маніпулятора для того щоб він міг штовхати лист вперед через ріжучі леза для того щоб збільшити швидкість цього процесу на виробництві та подбати про безпеку робітників.

В роботі наведено результати аналізу основних публікацій, нормативних, довідкових матеріалів за темою роботи, проведено аналіз існуючих процесів різання листів на виробництві, виконано проектування роботизованої руки для подачі металевого листа в різальний верстат, окрім цього було проаналізовано автоматизацію роботизованого маніпулятора, який використовується для перенесення аркуша.

## ABSTRACT

Explanatory note: 83 p., 39 fig., 3 tabl., 11 sources.

ROBOTIC MANIPULATOR, ROBOTIC HAND, CUTTING BLADES,  
AUTODESK-INVENTOR 2017, SUCTION CUP.

The object of of the research is the design and structural analysis of a robotic arm for feeding a metal sheet into a cutting machine.

The subject the study is a robotic manipulator used to transfer a sheet.

The purpose of the work is to analyze and design a new model of a robotic manipulator so that it can push the sheet forward through the cutting blades.

The work presents the results of the analysis of the main publications, normative and reference materials on the topic of the work, the analysis of the existing processes of cutting sheets in production was carried out, the design of a robotic arm for feeding a metal sheet into a cutting machine was performed, in addition, the automation of the robotic manipulator used to transfer the sheet was analyzed.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	6
Вступ.....	7
1 Аналіз предметної області.....	8
1.1 Аналіз літератури .....	8
1.2 Аналіз технічного завдання .....	9
1.3 Постановка задач дослідження .....	10
1.4 Висновки до розділу 1.....	10
2 Аналіз існуючих конструкцій .....	12
2.1 Шарнірно-зчленовані роботи.....	12
2.2 Кінцевий ефектор робота .....	13
2.3 Висновки до розділу 2.....	14
3 Проектування конструкції.....	15
3.1 Механічне проектування .....	16
3.1.1 Проектування муфти .....	18
3.1.2 Проектування плеча.....	20
3.1.3 Проектування передпліччя.....	21
3.1.4 Проектування зап'ясткової частини кисті .....	22
3.2 Пневматичні циліндри .....	23
3.3 Збірка .....	24
3.3.1 Суглоб 1 (талія та плече).....	25
3.3.2 Суглоб 2 .....	28
3.3.3 Суглоб 3 (лікоть) .....	29
3.3.4 Суглоб 4 (зап'ястя) .....	30
3.3.5 Суглоб 5 (кінцевий ефектор) .....	31
3.4 Дослідження динамічної поведінки роботизованої руки .....	34
3.5 Висновки до 3 розділу .....	40
4 Моделювання та аналіз.....	41
4.1 Підбір матеріалів для виготовлення.....	41

4.2 Проведення аналізу напружень .....	44
4.3 Навантаження та граничні умови .....	45
4.4 Проведення аналізу напружень в збірці .....	47
4.5 Створення сітки .....	51
4.6 Стрес-аналіз середовища.....	53
4.7 Аналітична модель .....	54
4.8 Результати стрес-аналізу .....	57
4.9 Конвергенція.....	67
4.10 Аналіз втоми матеріалу .....	69
4.11 Висновки до розділу 4.....	74
Висновки .....	74
Перелік джерел посилання .....	76
Додаток А Код MATLAB для розрахунку кількості циклів.....	78
Додаток Б Демонстраційний матеріал .....	81

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЗП – захватний пристрій;

МСЕ – метод скінченних елементів;

САПР – системи автоматизованого проектування;

ФМ – фактор міцності;

CFRP – пластик, армований вуглецевим волокном;

FANUC – автоматичне числове керування.

## ВСТУП

Найбільш застарілими методами є металообробні процедури зрізання і згинання. Це основні операції, які виконуються для обробка металу. Стрижка – це механічна операція розрізання великих листів метал на дрібніші частини заданих розмірів. Коли операція завершена весь периметр, що утворює лінію із замкнутою геометрією, відомий як бланкінг. Ножиці бувають різних типів, але типові ножиці зазвичай складаються з:

- стаціонарного ліжка, до якого прикріплено одне лезо;
- вертикально рухома траверса, яка встановлюється на верхньому лезі;
- ряд притискних штифтів або ніжок, які утримують матеріал на місці поки відбувається різання;
- система вимірювання, передня, задня або прямокутна рука для виробництва конкретні розміри заготовки.

Операція стрижки зазвичай виконується вручну, але це можливо також здійснюється за допомогою механічних, пневматичних і гідравлічних засобів.

В даний час операція виконується вручну в промисловості, але з дуже високим ризиком. Сировину збирає робітник і подає в машину для стрижки машину вручну, доки лист повністю не втягнеться в неї. Ця операція дуже небезпечна для персоналу, який її виконує. Також автоматизація цього процесу може прискорити швидкість роботи у порівнянні з ручним виконанням.

Кваліфікаційна робота виконана згідно [1-2].

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

## 1.1 Аналіз літератури

Дана робота направлена в основному на проектування та структурний аналіз роботизованої руки, яка зменшує робочу силу і може добре вплинути на швидкість виробництва.

Розвиток автоматизації може знизити витрати на прибуток і підвищити здатність надавати послуги при низькому масштабуванні витрат.

Щоб подбати про безпеку робітників, було розроблено оператора pick and place тобто роботизована рука, а для механізму подачі сконструйовані два пневмоциліндри. Раніше було вивчено різні механізми подачі, серед яких було розроблено нову модель, тобто використовують пневматичні циліндри, що штовхають лист вперед через ріжучі леза [3]. При цьому процесі час підготовки скорочується для кожного листа.

Також було вивчено керування (RCC – remote compliance center) для проектування роботизованої руки [4]. При цьому система інтегрує датчик положення маніпулятора в рутину управління роботами. Це також дає роботу здатність взаємодіяти з природою. Тому, залежно від цих умов, маніпулятор робить його більш ефективним, забезпечуючи систему самооптимізації. При такому самоусвідомленні робота буде безпека праці в навколишньому середовищі на об'єкті. За рахунок цього коефіцієнт корисної дії (ККД) підвищується ефективність роботи маніпулятора. Щоб розробити ці моделі RCC, потрібно порівняти з революційною симетричною структурою та круговою періодичною структурою, завдяки цьому можемо досягти низької жорсткості, а матеріал залишиться незмінним [4].

## 1.2 Аналіз технічного завдання

Під час стрижки листів збір листа та подача відбувається вручну, що забирає багато часу та бере участь у цьому факторі ризику. Отже, для першого етапу (збирання листа зі штабеля) потрібно уникнути цього, використовуючи автомобільну програму, тобто оператора pick and place, і механізм автоматичної подачі запускається з двома циліндрами, паралельними листу. Як вже було сказано вище, підбір і розсип регулюється як безперервна операція для збирання листів і розміщення їх на конвеєрній стрічці. Розглянемо оператора pick and place, тобто конструкцію роботизованої руки (рис. 1.1).

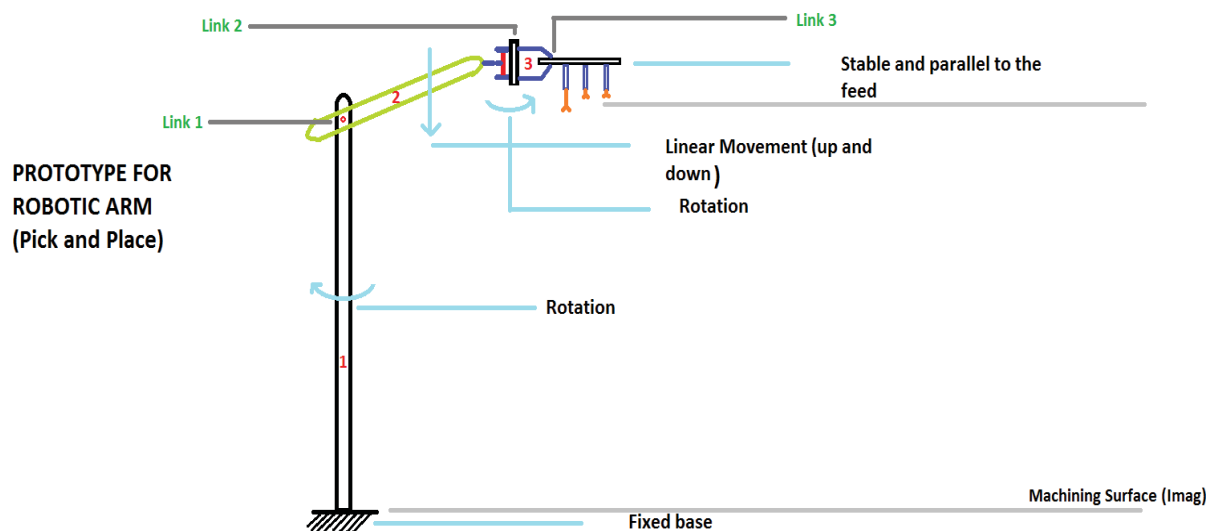


Рисунок 1.1 – Прототип роботизованої руки (оператор pick and place)

На наведеному вище рис. 1.1 потрібно розглянути три ланки роботизованої руки, оскільки основа закріплена. Ці три ланки з'єднані між собою фінгом. Link1 має обертальний рух, link2 має перехідний рух вгору і вниз. Link3 – це знову обертальний рух. Ближче до кінця ланки3 розміщується кінцевий ефектор, який стійкий і паралельний подачі.

За допомогою цієї роботизованої руки потрібно проаналізувати сили на окремий компонент і всю руку. Тепер розглянемо вільні тілесні діаграми окремих посилань. Кінцевий ефектор з'єднаний з ланкою3, яка оснащена

присосками для підйому листа. При цьому необхідно проаналізувати статичні і динамічні властивості руки. Тиск у вакуумних чашках переводиться в зусилля і сума сил повинна бути більше, ніж вага листа. Співвідношення тиску і сили повинні бути відкалібровані для кожної ланки, а також для всього плеча.

Основною ідеєю цього проекту є впровадження роботизованої руки. Незважаючи на те, що вона може бути реалізована різними методами, при врахуванні різних параметрів ця модель є найбільш можливим способом реалізації. Інші способи втілення моделі в життя дозволяють їм адаптуватися до навколишнього середовища.

### 1.3 Постановка задач дослідження

Провести проектування, моделювання та імітація механізму pick and place. Потрібно провести дослідження часу між ручним керуванням і нещодавно розробленим автоматизованим керуванням.

Частота роботи цього оператора, його повторюваність, термін служби і т.д. повинні бути з'ясовуваними.

Вибір кінцевого ефектора, його проектування і аналіз повинні бути проведені та задокументовані.

Перш ніж призначити операторів підбирання та місця, було проаналізовано різні методи, такі як використання конвеєрної стрічки, шківів та інших спрощених механізмів для цієї операції. Але після широких пошуків і досліджень було вирішено розробити шарнірно-зчленовану роботизовану систему, яка робить весь процес більш гнучким і простішим у запуску механізму без будь-якого корисного навантаження співробітників. Причина вибору в якості рішення тільки цього конкретного робота залежить від багатьох факторів. Найперший з них полягає в тому, що ці листи отримують. Пофарбовані та надруковані по черзі та складені в кінці процесу друку. Транспортування листів в цьому процесі здійснюється за допомогою рами з

присосками, з'єднаних з транспортерною стрічкою. Машина для стрижки розташована близько до штабеля, а напрямок подачі в машині для стрижки перпендикулярний напрямку штабеля.

Це пов'язано з тим, що час одного циклу друку і час одного циклу роботи зсуву не однакові. Отже, ці два процеси неможливо пов'язати між собою без укладання листів. Крім того, простір навколо цих двох машин дуже малий, щоб застосувати будь-яку іншу техніку автоматизації. Отже, пам'ятаючи про це, можна дійти висновку, що шарнірна роботизована рука може виконувати роботу з підбору та розміщення в заданому просторі та може ідеально співвідносити ці дві операції.

Підкресливши вище сказане, головна мета – зменшити фактор ризику, який фізично бере участь у цій операції. Таким чином, було розпочато розробку тришарнірної роботизованої системи з хорошим і гнучким кінцевим ефектом. В основному, в дослідженні, шарнірно-зчленовані роботи мають систему поворотних шарнірів, які можуть варіюватися від двох до десяти шарнірів і механізовані серводвигунами. Це різні роботизовані системи, які можуть бути шарнірними і нешарнірними. Але відповідно до цієї роботи було підготовлено систему поворотних шарнірів, яка є шарнірною, при цьому споживання простору зводиться до того, що з'єднання підтримуються ланцюгом. Основними факторами ініціювання цієї системи є безперервний шлях, прийнятний ступінь свободи, правильне зчеплення, циклічне обертання, хороша точність і виліт, контроль швидкості, повторюваність і висока роздільна здатність.

#### 1.4 Висновки до розділу 1

Таким чином можна зробити висновок, що розвиток автоматизації може знизити витрати на прибуток і підвищити здатність надавати послуги при низькому масштабуванні витрат, а також необхідно зменшити фактор ризику, який фізично бере участь у цій операції.

## 2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

### 2.1 Шарнірно-зчленовані роботи

Роботи з шарнірною рукою, як правило, використовуються для виконання ризикованих, підступних і дуже повторюваних і неприємних робіт. Вся ця система керується навченим оператором за допомогою портативного пристрою, такого як підвіска для навчання робота, щоб виконувати свою роботу вручну. Основна перспектива полягає не в роботі робота, а в тому, як він повинен бути захищений при регулярному використанні в промисловості. Технічне обслуговування залежить тільки від технічних операторів, наскільки небезпечним є використання роботизованої системи, її умов навколишнього середовища, положення, вимог до ініціалізації, технічних помилок та інших функцій [5].

Хоча багато інженерів працюють над цими роботами, вони можуть бути пов'язані з ризиками в процесі експлуатації. У цій комбінації вони повинні використовувати методи захисту, такі як системи повторення та резервного копіювання, і все це має контролюватися людиною-оператором. Оскільки вся система повинна управлятися електричним пристроєм, вони являють собою два контролери: сервопривід і несервопривід. Використання сервопривід дає величезний зворотний зв'язок про систему робота, який постійно контролює осі робота, які співвідносяться з положенням, швидкістю, і всі дані зберігаються в пам'яті робота. Оскільки несервопривіди не мають критеріїв зворотного зв'язку, а управління системою здійснюється за допомогою дуже кінцевих перемикачів. Отже, в цьому випадку, оскільки в цій роботі потрібна резервна система, найкраще ініціювати сервопривід [5].

## 2.2 Кінцевий ефектор робота

Кінцевий ефектор – це один з аспектів, який змушує робота давати адаптивні рішення [5]. Цей пристрій розроблений таким чином, щоб мати чудовий зв'язок із навколишнім середовищем, і робота кінцевого ефектора повністю залежить від додатків робота. По суті, кінцевий ефектор - це не що інше, як захват або пристрій, який працює відповідно до різних застосувань, викликаних в ньому, і коли розглядається це до роботизованої свідомості. Вони бувають різних підрозділів, як: імпульсивний, інгресивний, астриктивний, суміжний. Вони працюють по-різному для різних кінцевих ефекторів [6]:

- імпульсивий – працює як щелепа або ніготь, які хапають фізично, створюючи фізичне зіткнення з об'єктом, на який потрібно впливати;
- інгресивний – використання шпильок, голок, які допомагають фізично проникати в поверхню об'єкта. поверхню об'єкта. У моєму випадку я використовую вакуумні чашки, щоб підчепити аркуш;
- астриктивний – це не що інше, як всмоктування, яке створюється на поверхні об'єкта об'єкта, який створюється за допомогою вакуумних чашок, а також за допомогою електромагнітними матеріалами, якщо вони використовуються;
- суміжний – необхідно мати прямий контакт для утримання об'єкта, наприклад, поверхневий натяг об'єкта, що створюється в певній точці.

Отже, це категорії, засновані на різних фізичних благах системи. А в індивідуальному призначенні, в залежності від робочого матеріалу, наприклад, для металевих листів, вакуумні присоски або електромагніти відіграють домінуючу роль в якості кінцевих ефекторів. У цьому випадку було враховано багато факторів і з'явилася можливість виступити з ініціативою розробити відповідні вакуумні присоски таким чином, щоб лист міцно збирався з певним тиском і розміщувався на конвеєрній стрічці

операції зрізання без будь-якого нерівномірного руху листа [6].

Після глибокого вивчення було пройдено багато методів розробки шарнірно-зчленованих роботів, як операторів pick and place.

Система FANUC була взята за основу при розробці нового робота відповідно до обмеженого середовища та матеріалу роботи [7]. Вся модель спроектована в параметричному форматі Creo 3.0, частина Assembly and Simulation виконана в Autodesk Inventor 2017.

### 2.3 Висновки до розділу 2

Таким чином було проаналізовано існуючі конструкції, а також було виявлено параметри кінцевого ефектора робота. А також було виявлено що Система FANUC була взята за основу при розробці нового робота відповідно до обмеженого середовища та матеріалу роботи.

### 3 ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ

Конструкція роботизованого маніпулятора означає, що людський нагляд за цією операцією має бути зменшений. Робот, над яким проводиться робота, може обробляти по одному аркушу за раз. Отже, перша функція, яка очікується від цієї автоматизації, – це взяття одного аркуша зі стопки з багатьма аркушами. Існує багато варіантів, які можна розглянути для цієї операції перенесення. Наприклад, набір присосок на конвеєрі або заміна присосок на електромагніти. В цьому випадку не можна використовувати електромагніти, оскільки вони можуть захопити кілька аркушів замість одного [8].

Ріжучі леза не можуть брати більше одного полотна. Звичайно, він може різати по 2 листи за раз, але леза швидко зношуються. Щоб переконатися, що піднімається лише один аркуш, буде використовуватися присоски. Якщо взагалі розглядається можливість створення роботизованої руки для перенесення аркуша, то кінцевий ефект повинен складатися з присосок. Між конвеєром і роботизованою рукою було обрано роботизовану руку з двох причин [8].

По-перше, роботизований маніпулятор займає менше місця в порівнянні з конвеєрною установкою. У галузі, в якій проходить робота, місце і положення цієї машини дуже важливі. Лише для того, щоб встановити додаткове вдосконалення, не можна замінити всю машину, яка є дуже великою. Тож, щоб вписатися в невеликий простір, було продумано, що роботизована рука краще, ніж конвеєрна установка [8].

Другою причиною була її портативність, наскільки легко її можна транспортувати. Безумовно, роботизований маніпулятор можна швидко транспортувати з одного місця в інше. Отже, враховуючи всі вищезазначені причини, було вирішено розробити роботизовану руку з кінцевим ефектором типу pick and place.

### 3.1 Механічне проектування

Найважливішим аспектом і основою магістерської роботи є механічна конструкція роботизованої руки. Роботизована рука має певні конструктивні характеристики, і певні параметри слід враховувати. Оскільки, дизайн - це область, пов'язана з думкою, на початкових етапах проектування в голову приходять безліч різновидів конструкцій. Все може бути не дуже плідно, а методу проб і помилок не можна сліпо довіряти. Отже, пам'ятаючи про всі ці речі, було вирішено розробити роботизовану руку, розміри якої базуються на стандартах розмірів роботизованої руки Fanuc. Основними моментами, на які слід звернути увагу і яких слід дотримуватися при проектуванні, є [8]:

- функціональність: рука повинна мати можливість піднімати, переміщати, опускати і відпускати предмет, при цьому точно імітуючи рух руки людини при повному розгинанні. Будь-який пристрій, який може виконувати необхідні рухи для підняття та розміщення необхідного об'єкта, відповідав би вимогам цього критерію. Вибір кількості деталей саме в цьому роботизованому маніпуляторі здійснюється шляхом порівняння її з людською рукою. Нехай в уяві з'явиться дія людської руки, яка піднімає контейнер. Є талія, плече, лікоть, рука, зап'ястя і пальці роблять свою роботу. Це і є мотивація вибору кількості деталей. Ця роботизована рука також має 5 частин і 5 суглобів, які дуже схожі на людську руку;

- надійність: пристрій повинен мати можливість послідовно піднімати та розміщувати предмети плавним чином. тобто рух пристрою повинен бути досить плавним, щоб не впустити предмети, які піднімаються. Тому будь-який пристрій, який може піднімати і переміщати предмет з одного місця на інше, не втрачаючи при цьому зчеплення, відповідав би критеріям. Після детального вивчення проводиться вибір кінцевого ефектора. Оскільки цей пристрій використовується для збирання та розміщення металевих листів, перша поширена думка, яка виникне у будь-якого розуму, полягає в тому, що магніт можна використовувати, щоб підняти лист вгору. Але проблема

полягає в тому, що товщина листа настільки мала, що існує дуже висока ймовірність того, що буде зібрано більше одного аркуша. Якщо на стригальну машину подається більше одного листа одночасно, це сильно пошкоджує стригове лезо, що може скоротити термін служби леза. Наступним варіантом, який був, було використання присосок для підйому простирадл. Це найбільш часто використовувана техніка для транспортування металевих листів в галузях промисловості по всьому світу. Тому було вирішено використовувати цю техніку для цієї мети. Також у промисловості з'явилося застосування присосок і лінійного робота (конвеєра) для транспортування листів в процесі друку. Отже, є достатньо мотивації та даних, щоб використовувати цю методику;

– діапазон і швидкість руху: як і людське тіло, роботи побудовані з однаковими суглобами між кістками, тут маємо обмежену межу для руху осі. У проектуванні цієї роботи кожна окрема вісь має свою власну здатність рухатися. Ступінь переміщення робота калібрується від центральної основи вісь. При цьому швидкість в операціях pick and place може бути різною, і це відбувається тому, що кожна вісь рухається з різною швидкістю. Повний рух операції реєструється в градусах, пройдених за секунду;

– корисне навантаження: обмежена вага кожного робота є його корисним навантаженням. Отже, критичні технічні характеристики та вага інструментів відкидаються. У цьому додатку це корисно для вказівки різних категорій роботів за вищевказаними специфікаціями;

– схоплення: у цій шарнірно-зчленованій збірці потрібно перевірити дві кінцівки, що є нічим іншим, як V-подібним і H-охопленням. Вважається, що вертикальний виліт дозволяє знати, наскільки високо може піднятися робот з точки зору збільшення висоти. Тоді як горизонтальне охоплення вважається таким, що знає відстань повністю витягнутої руки від основи до зап'ястя. У деяких інших програмах потрібно навіть враховувати короткий горизонтальний радіус дії;

– вісі: характерні сегменти робота пов'язані з механічними з'єднаннями,

які служать віссю руху. Було розроблено шарнірно-зчленованого робота з 5-осьовим рухом. Як правило, згідно зі знаннями, промислові роботи розроблені таким чином, щоб мати 6-осьовий механізм руху, але кількість і розміщення роботів просто дає варіацію гнучкості для кожної моделі.

### 3.1.1 Проектування муфти

Проектування першого компонента пов'язано з тим, що, виходячи з його вимірів, повинні виміряти частини, що залишилися. І вага всіх інших деталей, включаючи корисне навантаження, матиме свій великий вплив на цю деталь, оскільки вона є основою цієї роботизованої руки. Ця деталь являє собою збірку з двох різних деталей. Деталь 1 повинна обертатися навколо своєї осі і до неї підключаються інші деталі. Отже, це основне джерело транспортування. Двома допоміжними частинами в цьому вузлі є верхня частина і вал. Верхня частина сконструйована таким чином, що її нижня частина є однією стороною муфти Олдхема, як показано на рис. 3.1.

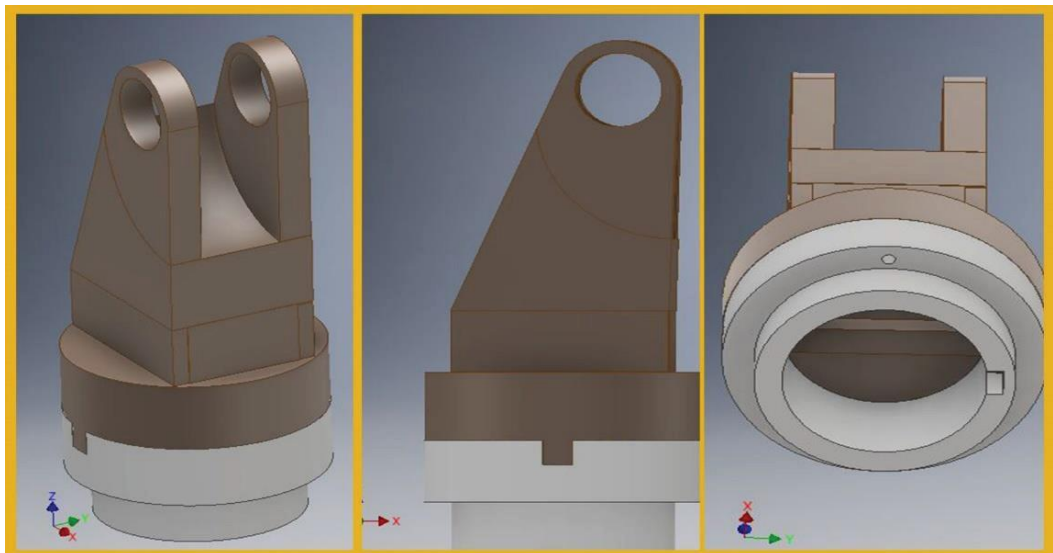


Рисунок 3.1 – Верхня частина муфти

Ця частина залишається у верхній частині основи і буде видна. Але є комбінація валу і шпонки, прикріплена до цієї деталі знизу, до якої підключено джерело живлення і змушене обертатися. Передбачається, що це

компонент, який передає рух (обертальний) від джерела живлення до верхньої частини тіла. Вал і шпонка і повна збірка деталі 1 показані на рис. 3.2. Вал і шпонка, вставлені в цей вузол, діють як типова муфта Олдхема.

Загальна муфта Олдхема має три фланці, один з'єднаний з входом, інший з'єднаний з виходом, і середній диск, який з'єднаний з першими двома шипом і пазом. Шип і паз з одного боку перпендикулярні шипу і пазу з іншого. Середній фланець обертається навколо свого центру з тією ж швидкістю, що і вхідний і вихідний вали. Його центр повторює кругову орбіту, двічі за оберт, навколо середини між вхідним і вихідним валами. Для цієї операції було зроблено невелику модифікацію муфти Олдхема. Замість того, щоб використовувати 3 фланці, було використано лише два, які не є фланцями точно. Було спроектовано кінці 2 частин в основі як муфти Олдхема, як показано на рис. 3.2.

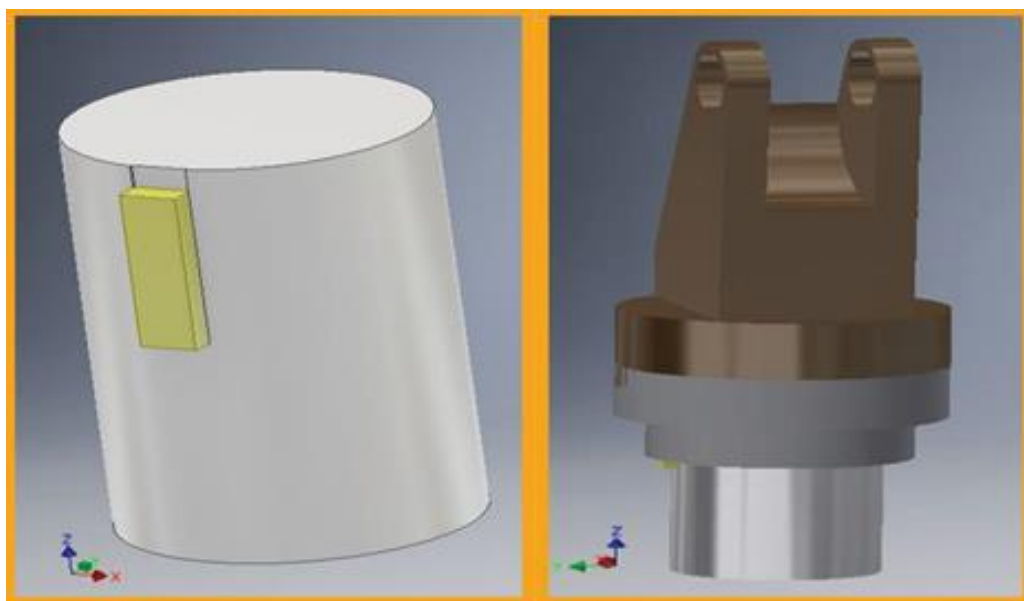


Рисунок 3.2 – Вал і ключ муфти

Оскільки це операція з підбором і місцем, два диски замість трьох можуть витримати діапазон крутного моменту цієї операції. Як бачимо, нижня частина муфти Олдхем має вал і шпонку. Верхній кінець, муфта має

фланець, який безпосередньо сконструйований з плечем роботизованої руки. Всій описаній до цього часу збірці буде присвоєно обертальний рух. Це означає, що двигун прикріплений до валу в нижній частині на рис 3.2 і якщо він обертається, обертається вся роботизована рука.

Довжина валу ( $L$ ) = 0,182 метра. Радіус валу ( $r$ ) = 0,12 метра.

Об'єм валу ( $V$ ) = 0,002055 метрів<sup>3</sup>.

### 3.1.2 Проектування плеча

Цю частину можна порівняти з біцепсом людської руки. Як і м'яз людської руки, він рухається набагато менше в порівнянні з передпліччям, але він забезпечує силу і утримання передпліччя і зап'ястя, щоб виконувати свою роботу.

Передбачається, що його довжина буде більшою, ніж частина 1, і меншою, ніж частина 3 (оскільки конструкція схожа на людську руку). Кінець цього плеча з'єднується з деталлю 1, створюючи суглоб 2, а інший кінець з'єднується з деталлю 3 для створення стику 3.

Конструкція цього кронштейна показана на рис. 3.3. Розміри зведені в таблицю в подальшій частині документа. Верхній кінець деталі має вал, який змушує себе обертатися навколо осі з'єднання між деталлю 1 і деталлю 2. Нижній кінець цієї деталі має отвори і зазор між двома розширеними пазами для розміщення деталі 3, створюючи стик 3. Джерело живлення з'єднаний з валом на верхній торцевій частині 2. Обертання цієї руки відбувається на цьому кінці. Його складання, створення з'єднання і його межі обговорюються в розділі складання. Розміри цієї деталі наведені нижче:

Довжина деталі ( $L$ )= 0,45 метра.

Товщина деталі ( $t$ ) = 0,08 метра.

Ширина деталі ( $b$ )= 0,153 метра.

Об'єм деталі ( $V$ )= 0.00359787 метрів<sup>3</sup>.

Площа деталі ( $A$ )= 0.269904 метрів<sup>2</sup>.

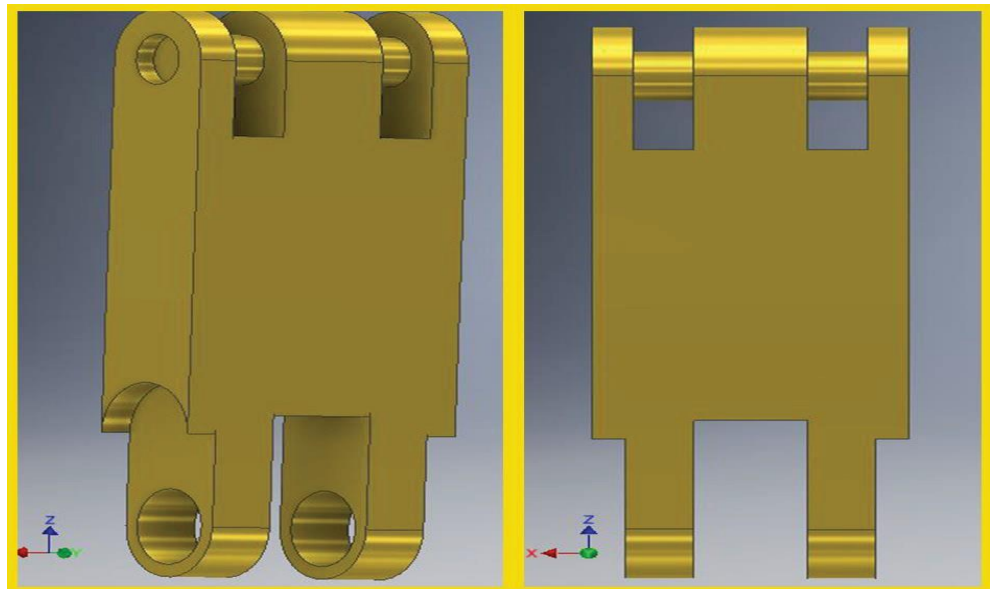


Рисунок 3.3 – Проектування плеча

### 3.1.3 Проектування передпліччя

Ця частина є передпліччям цієї роботизованої руки. Радіус дії цього робота в основному залежить від цієї частини. Це трохи довше, ніж частина 2. Рух цієї частини більше, якщо порівнювати з іншими частинами. Ця частина з частиною 2 створює суглоб, який схожий на лікоть на руці людини. Основне призначення цих двох рук - витримувати вагу, яку піднімає рука. Один кінець цього важеля з'єднаний з частиною 2, як описано раніше. Інший кінець з'єднаний з деталлю 4, яка є своєрідним зап'ястям до цієї руки. Джерело живлення для цього важеля подається на вал на лівому кінці (рис.3.4).

Розміри цієї деталі становлять:

Довжина деталі ( $L$ )= 0,775 метра.

Товщина деталі ( $t$ ) = 0,08 метра.

Ширина деталі ( $b$ )= 0,21 метра.

Об'єм деталі ( $V$ )= 0,008741335 метрів<sup>3</sup>.

Площа деталі ( $A$ )= 0,488215 метрів<sup>2</sup>.

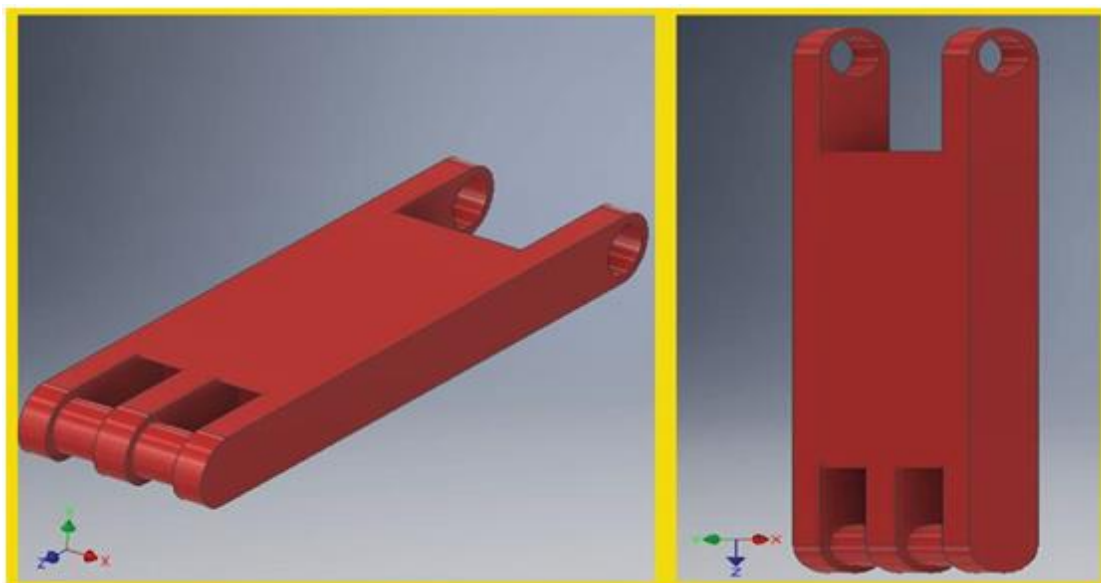


Рисунок 3.4 – Проектування передпліччя

#### 3.1.4 Проектування зап'ясткової частини кисті

Тепер підійшли до зап'ясткової частини кисті. Частина 4 – це сам зв'язок між кінцевим ефектором і частиною 3. Він має можливість обертатися навколо осі в кінці деталі 3 (навколо осі X).

Він може обертатися навколо осі на 360 градусів. Наскільки він повинен обертатися, можна регулювати відповідно до вимог користувача. Він також утримує кінцевий ефектор (деталь 5) у потрібному положенні. Він виконує роль суглоба для деталі 5, де деталь 5 може обертатися навколо власної осі (вісь Y). Частина 4 показана на рис. 3.5 нижче зліва. Між цими 2 компонентами створюється стик 4. Деталь 4 є стабільною, вона дозволяє частині 5 обертатися навколо осі Y.

Довжина деталі 4 (L)= 0,266 метра.

Висота деталі 4 (H)= 0,155 метра.

Об'єм частини 4 (V)= 0,000875211 метрів<sup>3</sup>.

Площа частини 4 (A)= 0,133435 метрів<sup>2</sup>.

Праворуч на цьому рис. 3.4 можна побачити частину 5. Це той, який обертається навколо осі Y. Ця деталь дозволяє з'єднати з нею пневмоциліндри. Ця деталь здатна витримати вагу 8 пневмоциліндрів і

прикріпленого до них листа, який потрібно підняти. У цій деталі є місце для перенесення ще 8 пневмоциліндрів. Розміри цієї деталі становлять:

Довжина деталі (L)= 0,75 метра.

Висота деталі (H)= 0,515 метра.

Ширина деталі (b)= 0,5 метра.

Об'єм деталі (V)= 0,005367438 метрів<sup>3</sup>.

Площа деталі (A)= 0,453101 метрів<sup>2</sup>.

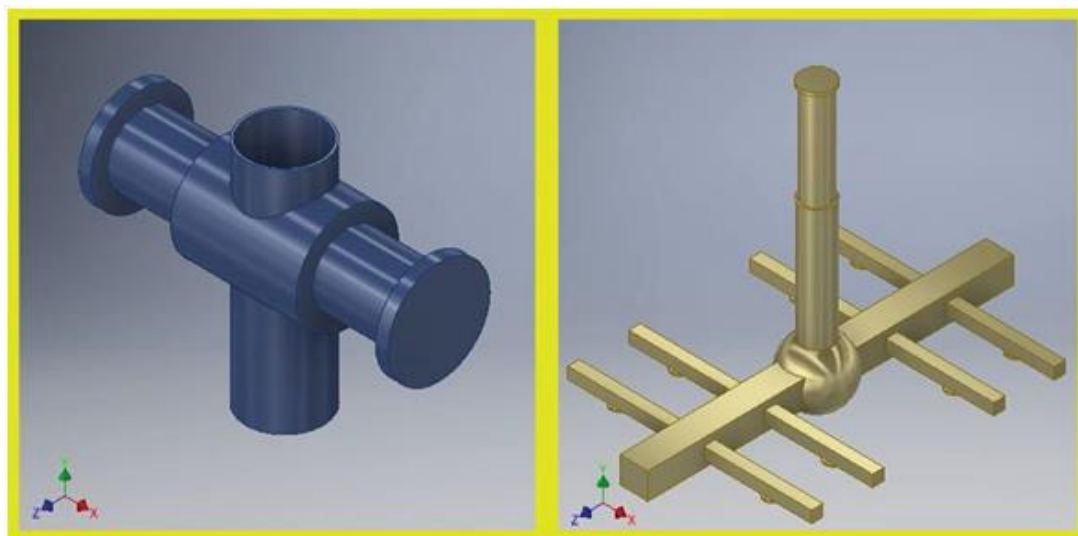


Рисунок 3.5 – Проектування зап'ясткової частини кисти

### 3.2 Пневматичні циліндри

Як вже було сказано раніше, засоби утримання листа в цій операції виконуються за допомогою присосок і пневмоциліндрів. Феномен цієї дії полягає в тому, що; Гумові присоски отримують місця на аркуші. А по готовності повітря між присоскою і листом відсмоктується і створюється тиск, близький до вакууму. Тиск зовні присоски занадто великий, ніж тиск всередині чашки. Так, повітря намагається потрапити всередину присоски через зазор між листом і присоскою. Це автоматично створює повітряну пробку, і лист міцно прикріплюється до присосок. Це явище вже використовується в промисловості в процесі друку, про який вже було

сказано раніше. Вузол пневматичного циліндра показаний на рис. 3.6.

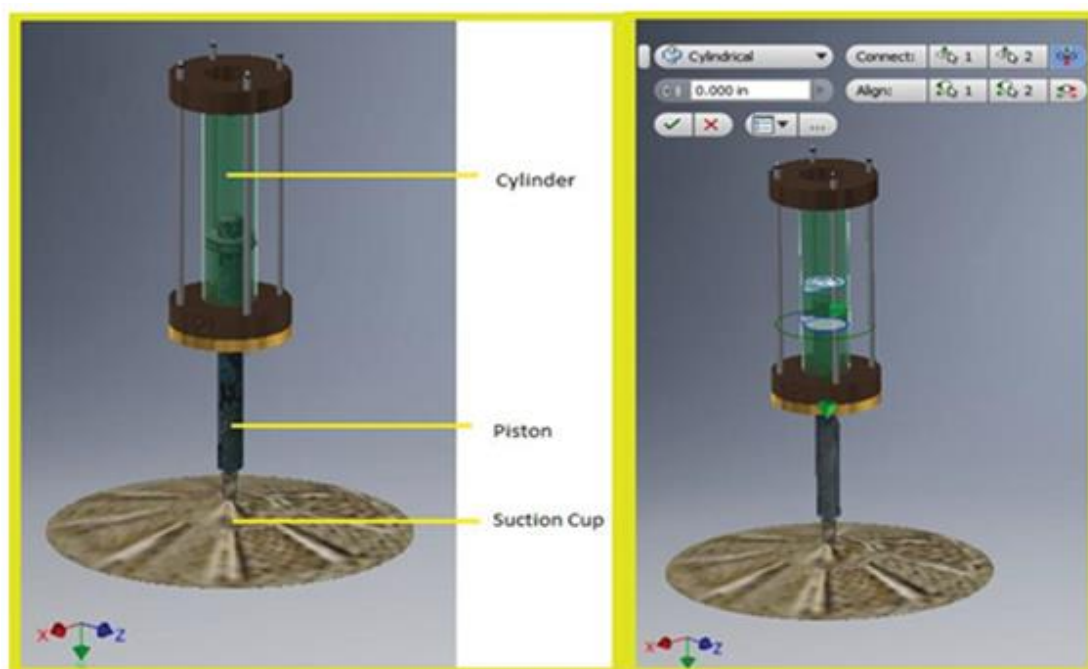


Рисунок 3.6 – Конструкція пневматичного циліндра

### 3.3 Збірка

Після проектування окремої деталі розробляється в CREO Parametric 3.0. Наступним кроком є те, що потрібно зібрати деталі, щоб сформувати повну роботизовану руку за допомогою програмного забезпечення Autodesk Inventor 2017 [7].

Вузол має руку з зап'ястям і кінцевим ефектором. Якщо описати функціонал роботизованої руки, то це система шести ступенів свободи. Під шістьма ступенями свободи (6DOF) мається на увазі свобода переміщення твердого тіла в тривимірному просторі. Зокрема, тіло може вільно змінювати положення вперед/назад (сплеск), вгору/вниз (підняття), вліво/вправо (коливання) у трьох перпендикулярних осях у поєднанні зі зміною орієнтації через обертання навколо трьох перпендикулярних осей, які часто називають тангажем, рисканням і креном.

Деталь в жовтому кольорі обертається навколо своєї осі. Деталі

червоного і коричневого кольору закріплюються на їх нижніх кінцях і рухаються вгору-вниз. Тепер описана найважливіша область роботизованої руки. Це зап'ястя і кінцевий ефектор. І пояснюється динамічна поведінка цих зібраних з'єднань нижче.

### 3.3.1 Суглоб 1 (талія та плече)

На рис. 3.7 можна побачити 3 частини. Основа закріплена, що очевидно, і перша частина була пофарбована в чорний колір. Деталь 1, як зазначено на рис. 3.7, може обертатися навколо своєї осі, перпендикулярної підставі. На скільки його обертати, повинен вирішувати користувач. Основа не обертається сама по собі. Було використано джерело живлення, яке обертає основу.

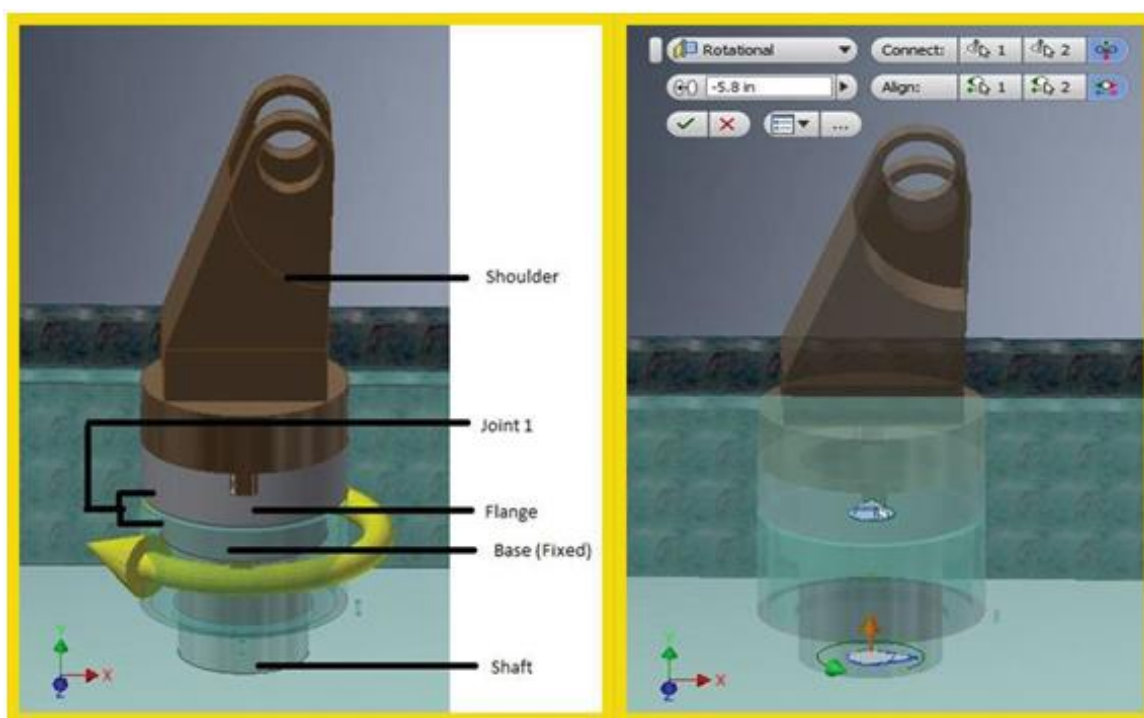


Рисунок 3.7 – Конструкція суглоба 1 (талія і плече)

Основа, яку було розроблено, може бути не такою простою, як схема, показана нижче. Спроектвана базова зона складається з 3 частин. Перший з них – фіксований, який забезпечує нерухому опору іншим рухомим рукам.

Друга і третя частини – це обертові. Вони збираються разом, як показано на рис. 3.7.

Отже, спочатку базова частина повинна бути міцно закріплена на землі, а стик 1 знаходиться між основою і деталлю 1, природа полягає в тому, що він обертається навколо своєї спільної осі на фіксованій межі від 0 до 360 градусів. Відстань між деталлю 1 і основою становить 1/8 дюйма, і вона створюється, щоб уникнути тертя між ними, але можна встановити зазор між цими двома частинами за допомогою опції у винахіднику. На рис. 3.7 нижче ліва має жовту позначку зі стрілкою, що показує напрямок обертання.

Оскільки відомо розміри суцільного валу, довжину, об'єм і радіус, тепер, щоб знайти крутний момент суцільного валу, потрібно розглянути кілька інших розмірів:  $R = 0,958$  м,  $W = 33$  N, де  $R$  – відстань радіального важеля від центру валу до максимальної довжини вигину важеля;  $W$  – навантаження, що діє на вал.

Отже, враховуючи наведені вище розміри, крутний момент підлягає калібруванню.

Крутний момент  $T =$  навантаження, що діє на вал, множиться на відстань радіального важеля від центру валу до максимальної довжини вигину важеля.

Отже, крутний момент дорівнює:

$$T = W \times R, \quad (3.1)$$

$$T = 33 \times 0.958. \quad (3.2)$$

Крутний момент суцільного валу становить 31,614 Нм.

Щоб дізнатися стабільність валу, потрібно знайти ФОС, який є нічим іншим, як фактором безпеки суцільного валу.

Потрібно обчислити індукований зсув і допустимий зсув, щоб знайти

коефіцієнт запасу міцності.

Індукований зсув дорівнює:

$$\frac{T \times 16}{\pi \times d^3}. \quad (3.3)$$

Тут, як відомо, радіус валу дорівнює  $r = 0,12$  м.

Тоді діаметр  $d = 0,24$  м.

Тепер потрібно підставити обчислені значення у формулу вище, щоб знайти індукований зсув валу.

Отже, індукований зсув дорівнює

$$\frac{31,614 \times 16}{3,14 \times (0,24)^3} = \frac{505,824}{0,0434} = 11654,9 \text{ кПа}. \quad (3.4)$$

Індукований зсув = 11,65 МПа.

Оскільки відомо, що індукований зсув допустимий зсув слід приймати з коду ASME залежно від матеріалу, який було розглянуто.

Отже, відповідно до коду ASME для алюмінієвого матеріалу Т6 6061 допустимий зсув суцільного вала розрахований нижче.

Максимальне напруження зсуву має бути 0,3-кратним напруженням розтягування відповідно до коду ASME.

Для алюмінієвого сплаву Т6 6061 розтяг = 276 МПа Для алюмінієвого сплаву Т6 6061 UTS = 310 МПа

Необхідно взяти найбільше значення, яке є UTS, для розрахунку допустимого зсуву за кодом ASME.

Допустий зсув буде дорівнювати:

$$0,18 \times 310 = 55,8 \text{ МПа}. \quad (3.5)$$

Отже, коефіцієнт запасу міцності дорівнює  $\frac{\text{Допустимий зсув}}{\text{Індукований зсув}}$

$$\frac{55,8}{11,65} = 4,75. \quad (3.6)$$

Коефіцієнт запасу міцності суцільного валу дорівнює 4,75.

### 3.3.2 Суглоб 2

Це з'єднання, яке утворюється поєднанням Частини 1 і Частини 2. Деталь 1 пов'язана з основою зі з'єднанням (суглоб 1). Саме цей шарнір дозволяє деталі 1 обертатися навколо своєї осі (осі Y). Тепер, коли деталь 2 прикріплена до деталі 1, деталь 2 може обертатися навколо своєї осі (вісь Z) у русі вгору та вниз і може обертатися навколо осі деталі 1 (вісь Y) одночасно, коли обидві ці частини з'єднані. Анатомія цього суглоба показана на рис. 3.8.

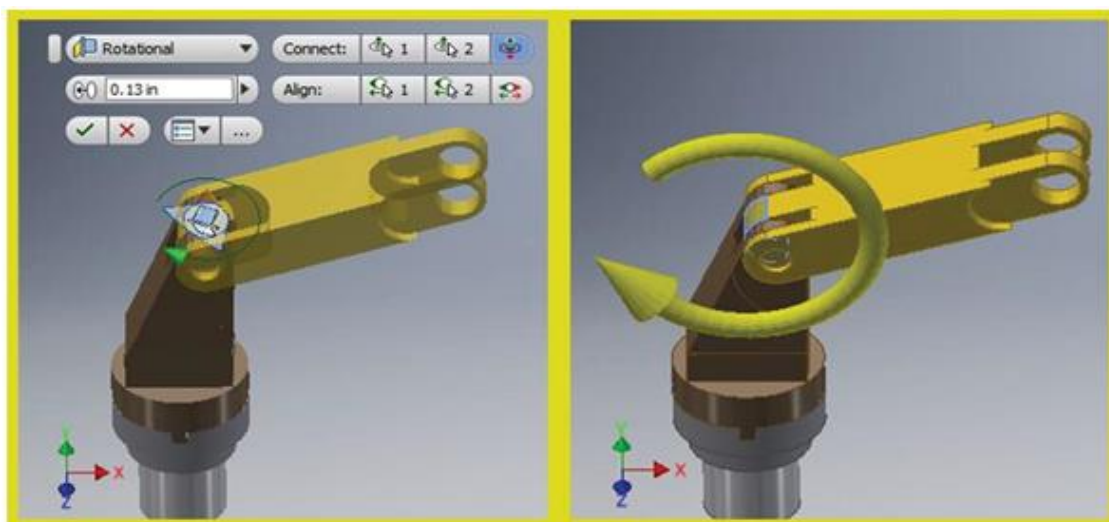


Рисунок 3.8 – Конструкція Joint 2

Суглоб 2 має фіксовану межу обертання, де деталь 2 (деталь жовтого кольору) обертається від 55 до 270 градусів. Однак ці межі дані такі, що обидві частини, що складають цей суглоб, не стикаються. Вони завжди можуть бути змінені користувачем. Зазори між стінками частини 1 і частини

2 рівні, і це досягається шляхом уникнення всіх можливих контактів між ними, так що не відбувається належного розвитку тертя, а зазор також регулюється.

### 3.3.3 Суглоб 3 (лікоть)

Подальша анатомія роботизованої руки стосується ліктя. Лікоть – це суглоб двох частин 2 і 3.

Основне призначення цього ліктя полягає в тому, щоб дати руці більше простору для переміщення кінцевого ефектора вперед. Хоча кожна ланка в роботизованій руці важлива і повинна нести певну вагу, але цей лікоть досить важливий, оскільки його можна назвати центром роботизованої руки. Лікоть являє собою суглоб з двох частин, які показані на рис. 3.9.

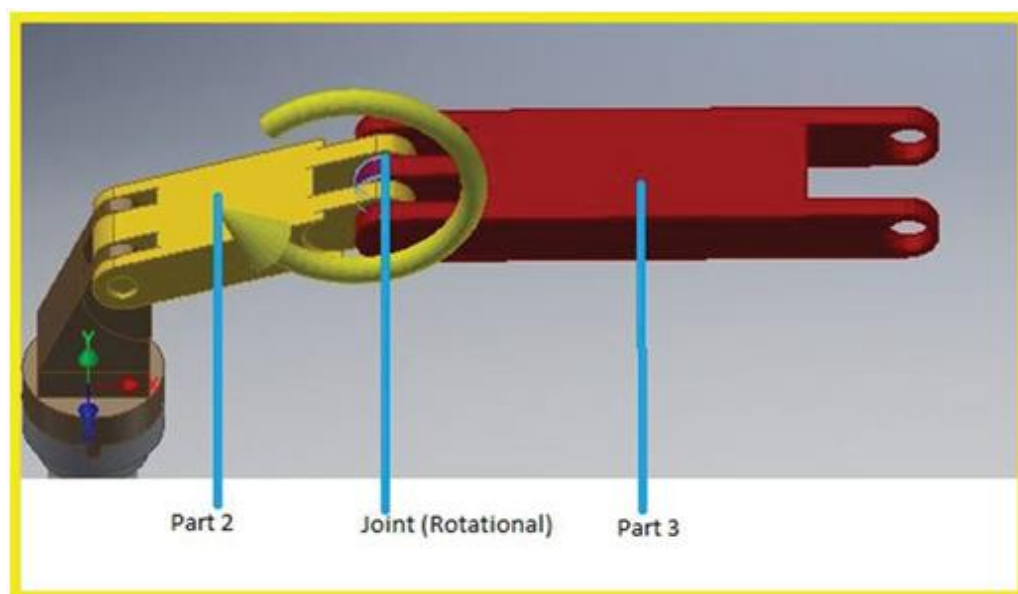


Рисунок 3.9 – Конструкція суглоба 3 (лікоть)

Ці дві деталі збираються один з одним і їх спільною точкою стає стик. Обидва вони повинні обертатися навколо осі Z, тобто рухатися вгору і вниз.

Жовта частина, показана на рис. 3.9, з'єднана з плечем роботизованої руки, показаної вище. Ця жовта частина продовжується іншим плечем червоного кольору, як показано на рис. 3.9.

Суглоб 3 має фіксовану межу обертання, тобто червона частина переміщається по позитивній осі від 0 до 100 градусів, а негативна вісь від 0 до -120 градусів.

### 3.3.4 Суглоб 4 (зап'ястя)

Зап'ястя – це область, яка врівноважує операцію. У цій операції найважливішим моментом є балансування листа під час його транспортування. Ця роботизована рука повинна взяти аркуш і помістити його в іншу точку. На рис. 3.10 показаний вид зверху прототипу роботизованої руки.

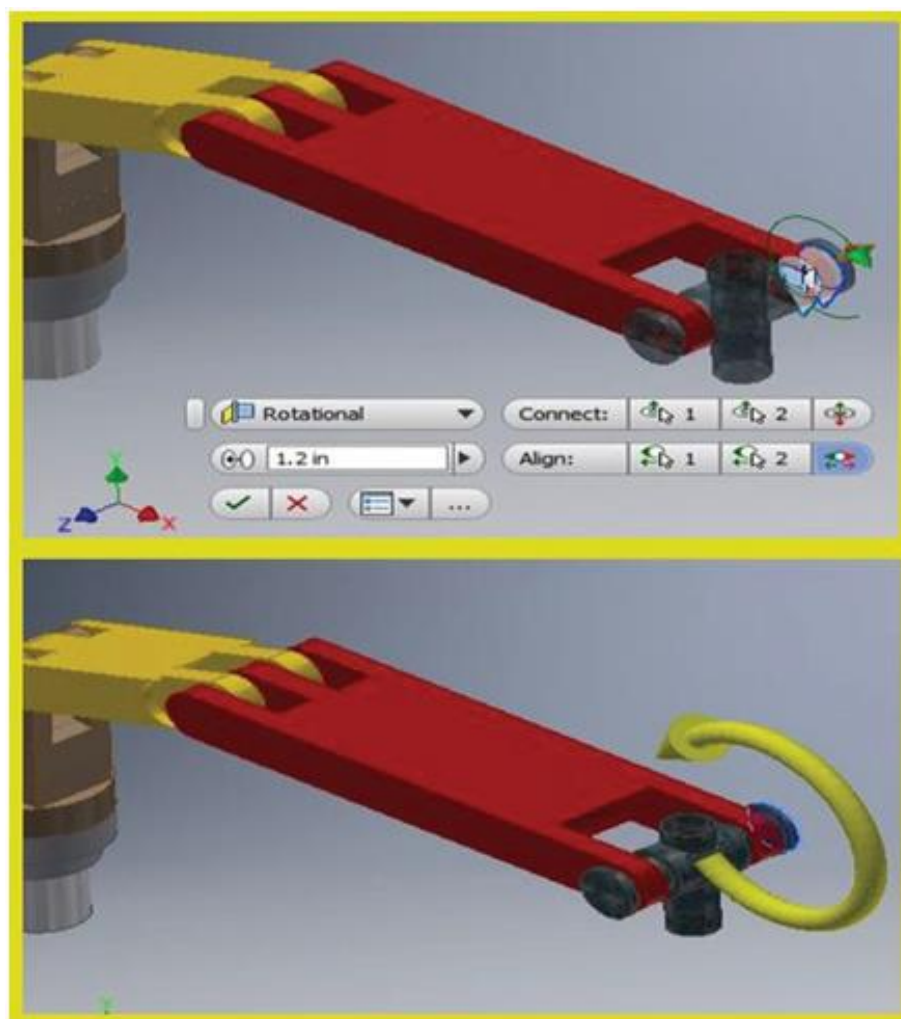


Рисунок 3.10 – З'єднання 4 конструкції (зап'ястя)

На рис. 3.10 є початкова і кінцева точка. Лист переноситься на всьому

шляху від пункту видачі до кінцевої точки. Найважливішим моментом є те, що лист повинен весь час залишатися паралельним поверхні стрижки. Важливу роль у цьому відіграє зап'ястя. Побудова цього з'єднання виконано таким чином, щоб деталь 4 оберталася навколо своєї осі (осі Z) і утримувала торець ефектора.

Оскільки деталь 4 менша за розміром порівняно з частиною 3, важливо збалансувати частину 4 між ними. Неправильна рівновага може позначитися на нерівномірному навантаженні на деталь 3 і нерівномірній деформації.

Суглоб 4 має фіксовану межу обертання, тобто позитивну вісь від 0 до 230 градусів і негативну вісь від 0 до -20 градусів. У частині 2, 3 і 4 між ними є з'єднання, які ідентичні, і їх природа не змінюється.

### 3.3.5 Суглоб 5 (кінцевий ефектор)

Суглоб 5 є найважливішою і делікатною частиною всієї цієї збірки. Цей стик знаходиться між частиною 4 і частиною 5. Деталь 5 обертається навколо осі Y в місці з'єднання.

Деталь 5 знову потрібно було зібрати з пневмоциліндрами. Рух суглоба 5 також ідентично суглобу 1, а отже, межі також однакові, тобто від 0 до 360 градусів. При цьому суглоби 1 і 5 рухаються навколо осі y, а суглоби 2, 3 і 4 рухаються навколо осі z.

У шарнірах 6 маємо вісім пневматичних циліндрів на кінцевому ефекторі, як показано на рис. 3.11, що означає, що вони складаються з восьми поршнів, і кожен поршень встановлений у відповідні циліндри з однаковими межами. Межі (якщо стінка поршня стикається з верхньою стінкою пневматичного циліндра і рух можливий тільки вниз), поршень має межу максимального вильоту 2,5 дюйма аж до 0,5 дюйма на кінці, те ж саме відбувається для решти семи поршнів, і таким чином шарнірно-зчленований важіль збирається.

На рис. 3.11 представлений повнокінцевий ефектор, який має 8 пневмоциліндрів і присоски на кінцях.

Всі ці з'єднання, зібрані разом, дають роботизованій руці, оператору вибору та місця. Ця роботизована рука тепер складається з частин, які є рухомими. Тепер треба призначити завдання для цих частин. Основне завдання полягає в тому, щоб підібрати та розмістити листовий метал з одного положення в інше.

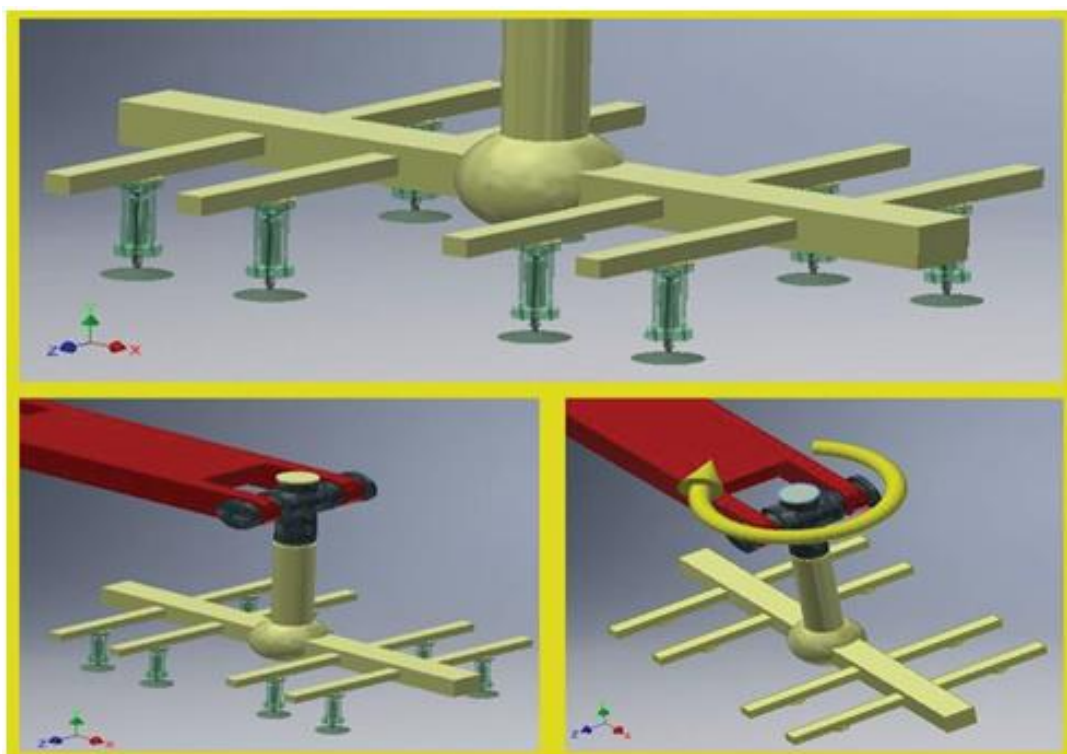


Рисунок 3.11 – Конструкція з'єднання 5 (кінцевий ефектор)

Ця основна робота поділяється на менші роботи і призначається кожній частині та суглобу. Вони, працюючи одночасно відповідно до заданих вказівок, виконують роботу. Цей набір напрямків пояснює динамічну поведінку роботизованої руки.

Повна збірка робота з шарнірною рукою показана на рис. 3.12.

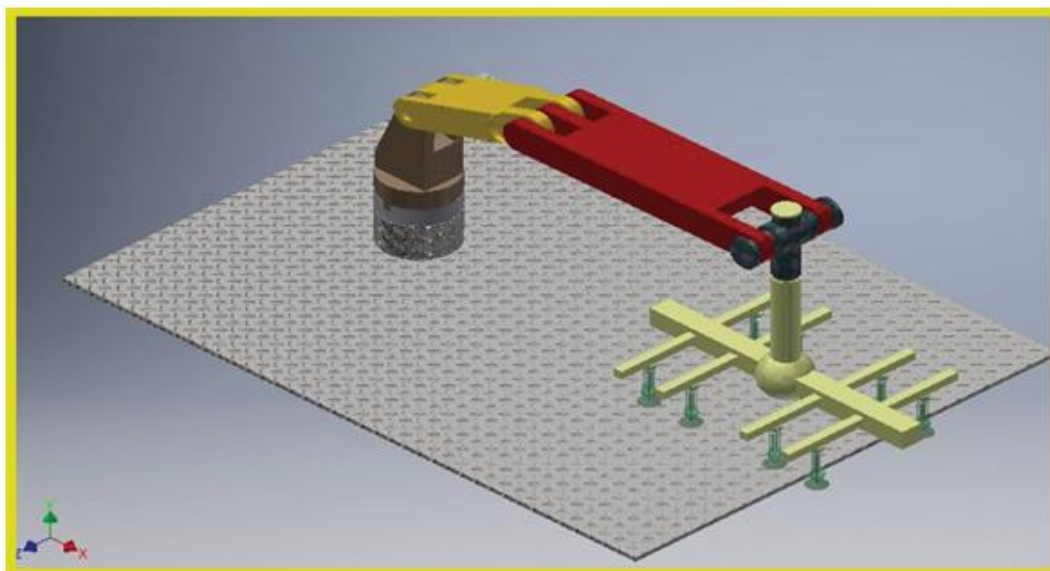


Рисунок 3.12 – Повна збірка шарнірно-зчленованого робота

### 3.4 Дослідження динамічної поведінки роботизованої руки

Найперша робота, яку потрібно виконати, це притримати лист і підготуватися до зльоту. Ця робота виконується кінцевим ефектором. У цьому випадку поршні 8 пневмоциліндрів, які маємо, збиваються вниз і присоски самі кріпляться до листа.

Коли вони прикріплюються до листа і між присосками і листом створюється повітряна пробка, поршневі штоки повертаються в циліндри, створюючи зазор між землею або штабелем і піднятим листом. Ця повторна дія відбувається за півсекунди, якби цей час не був фіксованим. Користувач може редагувати час відповідно до своїх побажань і вимог. Ці вхідні дані наведені в модулі динамічного моделювання [8] в Autodesk Inventor 2017.

Всі правильні вузли, створені в Inventor, перетворюються в необхідні з'єднання в модулі динамічного моделювання (рис. 3.13).

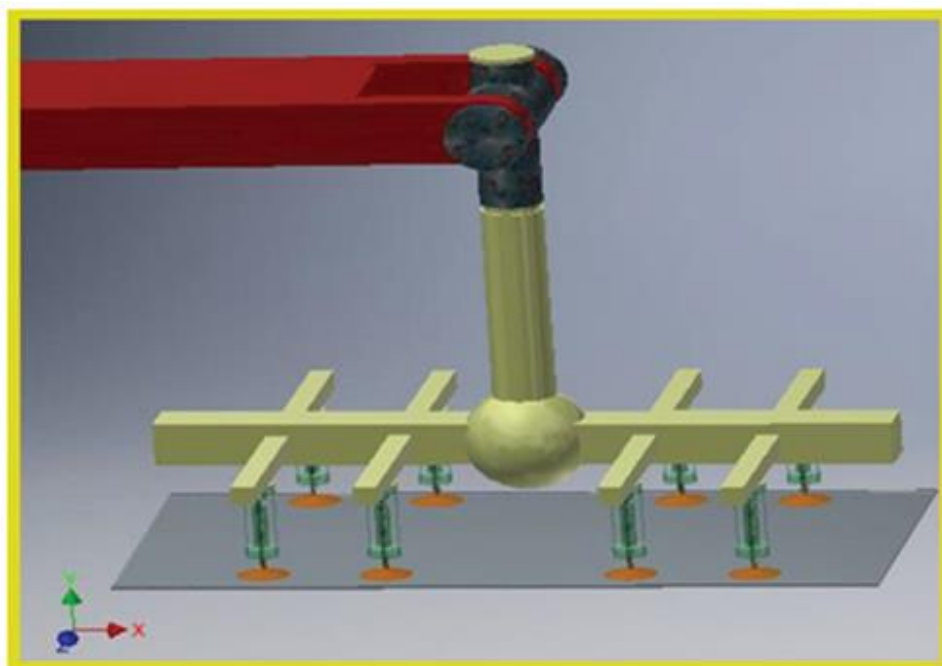


Рисунок 3.13 – Динамічна поведінка пневматичного циліндра

Наприклад, поршень розміщується в циліндрі і обмежує межі його руху таким чином, що він переміщається між передньою і задньою стінкою поршня. Цей вузол перетворюється на циліндричний з'єднання в середовищі динамічного моделювання.

Циліндричне з'єднання має природу, коли прикріплена деталь може рухатися поступально і може обертатися навколо своєї осі (рис. 3.14).

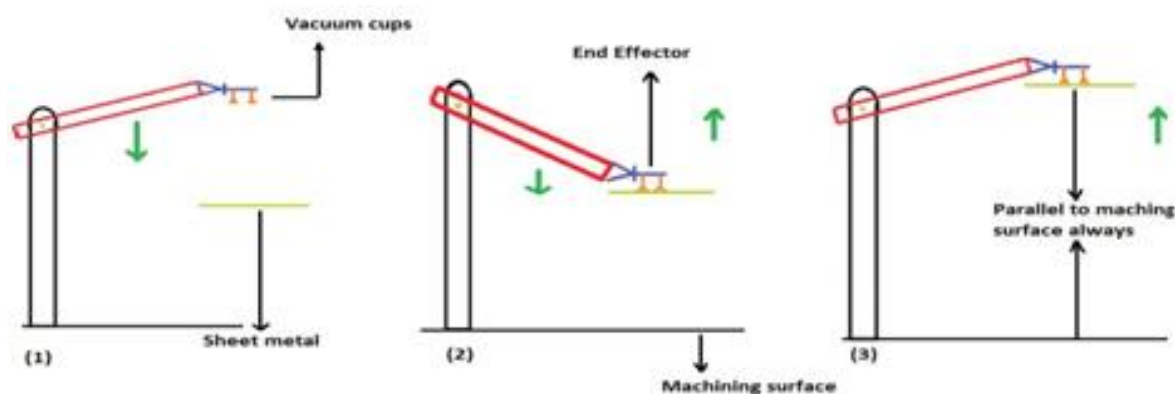


Рисунок 3.14 – Прототип роботизованої руки в трьох положеннях

Тільки поступальний рух є бажаним. Autodesk Inventor надає опцію блокування захватного пристрою (ЗП), за допомогою якої блокується

обертальний рух у цій частині. Загальна дія підняття листа вгору починається з 0 секунд і закінчується на 0,5 секунди. Тепер наступний рух починається з 0,6-ї секунди.

Наступне завдання полягає в тому, щоб підняти лист на більш безпечну висоту, щоб його можна було транспортувати з одного місця в інше. Слово «безпечний» використовується тому, що, якщо він знаходиться не на належній висоті, лист може вдаритися і зіткнутися з іншими механізмами або з будь-якою людиною, що стоїть поруч.

Ця робота по його підняттю є результатом одночасних дій між частиною 2, частиною 3 і частиною 4. На 0,6-й секунді деталь 2 починає рухатися вгору (проти годинникової стрілки). До кінця 2,5-ї секунди друга частина змінює своє положення на 37 градусів. У цей часовий проміжок відбувається одночасний рух в частині 3. Він також рухається вгору, змінюючи своє положення на 10 градусів, а потім на 20 градусів вниз.

Причина такого руху вгору і вниз полягає в тому, що існує безпечна відстань між кінцевим ефектором та іншими частинами роботизованої руки. Зіткнення безладні, але починається рух частини 3 з 0,7-ї секунди. Всі ці часові обмеження і команди можуть бути змінені на розсуд користувача.

Тепер настає найголовніше завдання, а саме максимально постаратися витримати лист паралельно землі (оброблювальну поверхню). Причина в тому, що лист утримується на основі повітряної пробки між присосками і листом. Так, якщо лист похилий, він змушений тягнути себе вниз і повітряний замок може бути порушений. Отже, щоб уникнути цього, важливо підтримувати лист паралельно землі.

Розглянемо людське зап'ястя, коли він піднімає і несе тацю зі склянками, наповненими водою. Під час підняття лотка, навіть якщо рука рухається вгору, положення зап'ястя змінюється з рухом, щоб тримати лоток паралельно землі, щоб вода не пролилася. Такий же механізм використовується і в зап'ясті.

Якщо подивитись на рис. 3.14, то це приблизний ескіз, що демонструє

поточну дію. Спостерігаємо, щоб синя деталь і лист весь час були паралельні оброблюваної поверхні. Ця синя частина є частиною 4, яка описана в попередніх розділах. Коли частина 2 і частина 3 рухаються вгору або вниз, деталь 4 обертається в протилежному напрямку, щоб покласти цей лист паралельно землі. Для цієї дії від 0,6-ї секунди до 2,5-ї секунди деталь 4, до якої підключений кінцевий ефектор, обертається на 28 градусів за годинниковою стрілкою. Ці три одночасні дії піднімають лист вгору на потрібну висоту і утримують його паралельно землі.

Наступним рухоме перенесення листа з положення в пункт призначення. Це одиночна дія суглоба 1, оберального суглоба між основою і деталлю 1. Деталь 1 обертається, а всі інші деталі, з'єднані з нею, зміщуються. Це обертання починається на 2,5-й секунді і закінчується на 5-й секунді.

Деталь 1 змінює своє положення, обертаючись на 90 градусів за годинниковою стрілкою від поточного положення. Але це не єдине завдання. Розглянемо приблизний ескіз нижче. Він показує три кроки цієї дії. У всіх цих кроках коло на рис. 3.15 є видом зверху деталі 1.

У розділі 1 роботизована рука знаходиться на 2,5-й секунді, тобто початковій точці обертання деталі 1.

Розділ 2 – це його положення під час руху, а розділ 3 показує кінцеву точку цього обертання (5-а секунда). На всіх цих трьох знімках аркуш, який на рисунку світло-зелений, завжди залишався в одному положенні по відношенню до червоної лінії на рисунку під час транспортування. Він лише змінює своє положення по відношенню до землі. Ця дія виконується суглобом 5 (ротаційний суглоб між деталлю 4 і ефектором).

Коли суглоб 1 починає діяти, суглоб 5 також починає діяти. Кінцевий ефектор обертається від 2,5-ї секунди до 5-ї секунди на 90 градусів, але проти годинникової стрілки.

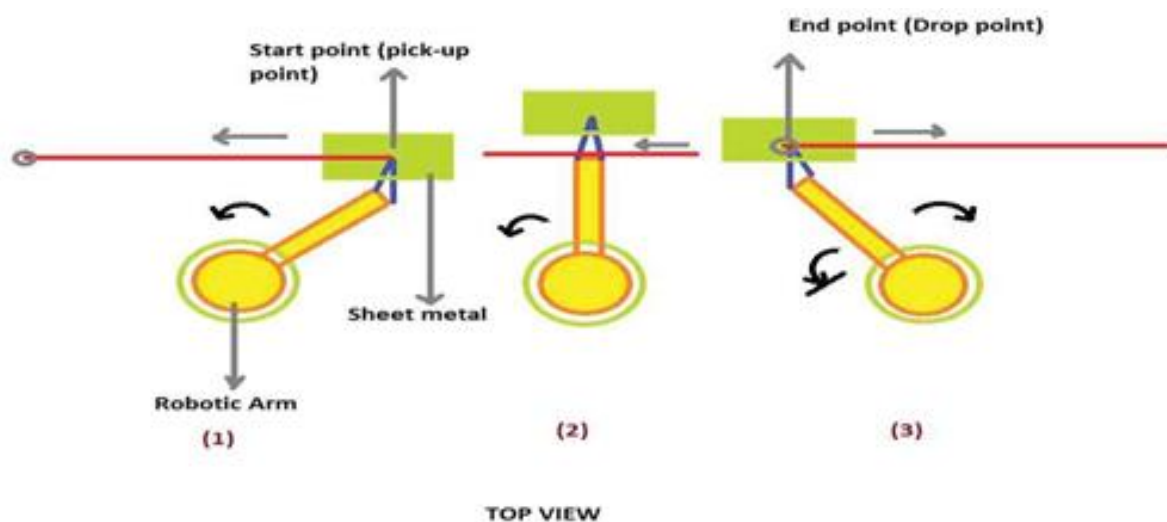


Рисунок 3.15 – Вид роботизованої руки зверху

Саме ця дія призначається в цьому процесі лише для перевірки та перевірки здібностей роботизованої руки. Вони завжди можуть бути змінені користувачем. Коли лист досягне 5-ї секунди, наступне завдання - покласти його. Ця дія знову пов'язана з частиною 2, частиною 3 і частиною 4.

Ця дія є дзеркальним відображенням дії підйому вгору, що виконується цими частинами (від 0,6-ї секунди до 2,5-ї секунди), різниця буде тільки в часі цієї дії. Ця дія починається з 5-ї секунди і закінчується на 7-й секунді. Знову присоски збивають вниз і кладуть лист вниз.

Ця дія триває від 7-ї до 7,5-ї секунди. Як приклад, графік позиції та часу частини 2 наведено на рис. 3.16.

Уся дія триває 7,5 секунд. Далі пояснюються кроки, пов'язані з призначенням цих положень і швидкостей у кожному суглобі.

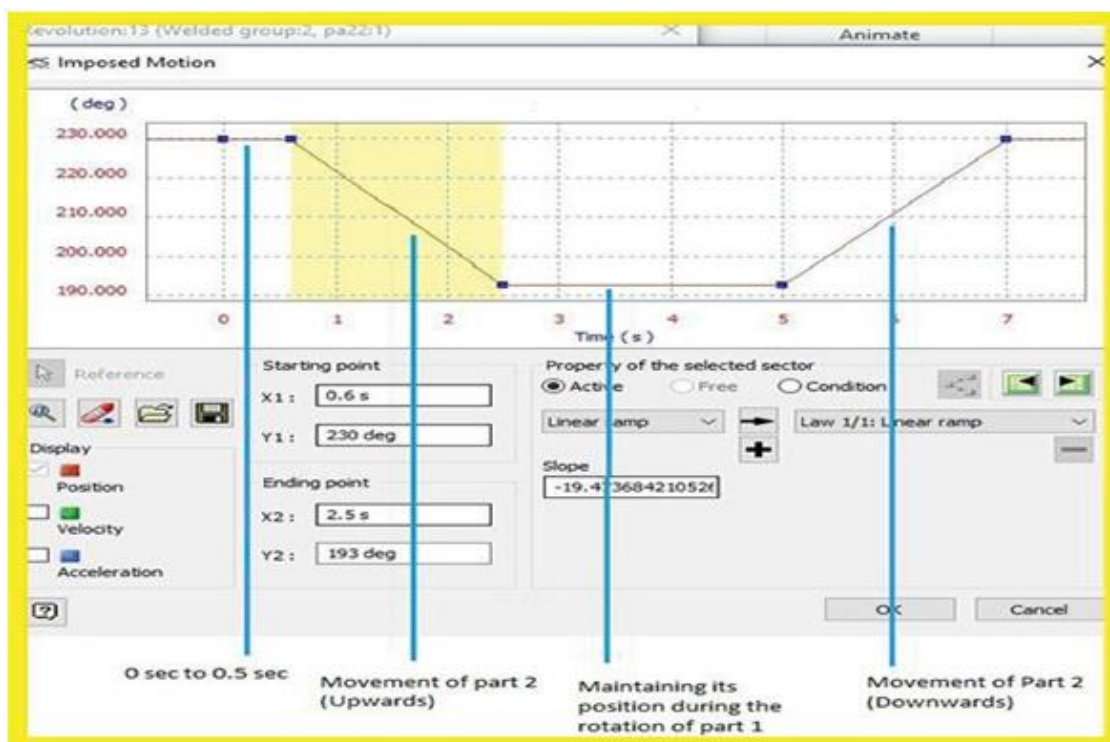


Рисунок 3.16 – Графік між позицією та часом

У розділі середовищ в Autodesk Inventor 2017 є модуль динамічного моделювання. Після того, як він відкритий, можна побачити розділ, який називається стандартними з'єднаннями в дереві моделі. Це виходить під час виконання складання.

Всі з'єднання, які призначаються в збірці, приймаються за стандартні з'єднання. У цьому випадку тут присутні всі описані вище стики. Якщо вони небажані або їх потрібно змінити, у цьому модулі доступна опція. На панелі у верхній частині екрана знаходимо деякі параметри симуляції параметрів. Якщо клацнути на цій кнопці, з'явиться пункт Автоматично перетворювати примуси на стандартні з'єднання. Вимкнувши її, можна редагувати власні суглоби в динамічній атмосфері за допомогою кнопки Вставте опцію з'єднання у верхній частині екрана. Тепер це просто розподіл дій для кожної руки та координація їхніх дій відповідно до роботи, яку потрібно виконати. Наприклад, виділимо з'єднання в данному випадку його з'єднання 3 (частина 2 і частина 3). Знайдіть це з'єднання в розділі стандартних з'єднань на дереві моделей. Клацніть по ньому правою кнопкою миші і виберіть властивості.

Знайдіть параметр редагування глибини різкості і почніть присвоювати значення або числовому значенню, або графу вхідних даних. Процес, який виконується для цього з'єднання, показаний на блок-схемі (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 – Побудова блок-схеми роботизованої руки

Виконання кроків з рис. 3.17 приведе до командного поля, показаного на рис. 3.18.

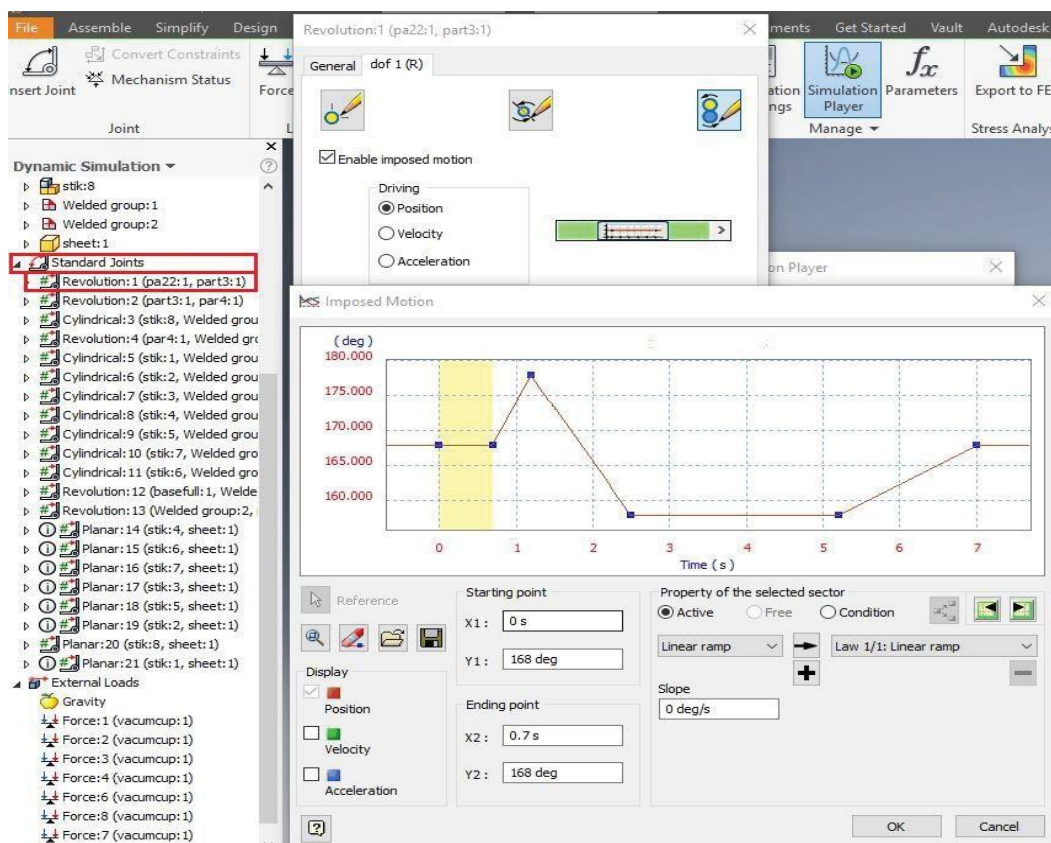


Рисунок 3.18 – Графік між положенням і швидкістю

### 3.5 Висновки до 3 розділу

Таким чином, маємо вибір: редагувати ЗП, змінювати траєкторію руху деталі або блокувати ЗП таким чином, щоб деталі взагалі не рухалися.

У цій збірці для роботизованої руки було використано обертальні шарніри для шарнірів 1, 2, 3 і 4, а також використано циліндричні шарніри між поршневими штоками та пневматичними циліндрами.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ

### 4.1 Підбір матеріалів для виготовлення

Роботи в основному виготовляються зі звичайних матеріалів. Деякі спеціалізовані роботи для застосування в чистих приміщеннях, космічній програмі або інших «високотехнологічних» проектах можуть використовувати металевий титан і конструкційні композити з вуглецевих волокон. Робоче середовище та необхідна міцність є основними факторами при виборі матеріалу (9). Сьогодні на ринку доступний широкий вибір металів і композитів. Відбір матеріалу – дуже глибокий процес.

На рис. 4.1 наведена інформація, що показує різні якості та характеристики матеріалів, побудованих один проти одного.

Підбір матеріалів здійснюється таким чином, щоб вони відповідали тим вимогам які необхідні до несучої здатності і не були занадто дорогими (рис.4.2). Підбір матеріалів і витратне дослідження для проектування економічної моделі – це зовсім інша і більш глибока область машинобудування.

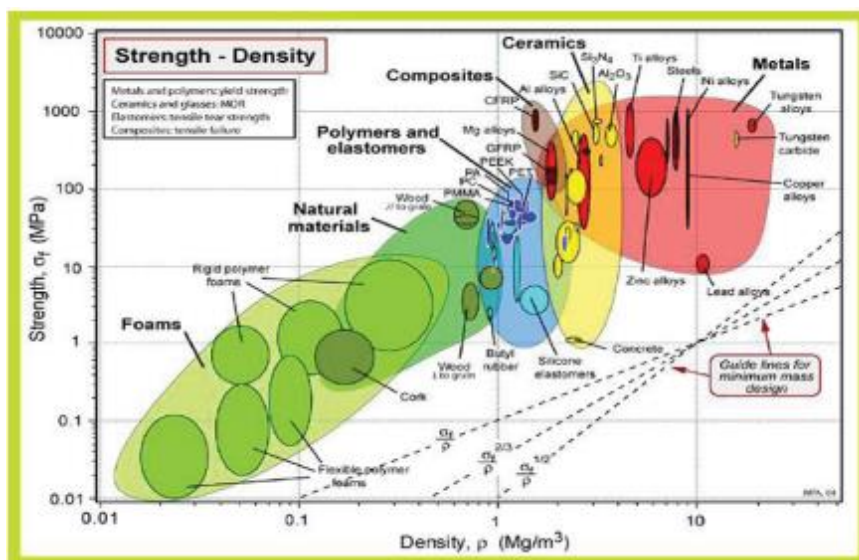


Рисунок 4.1 – Графік між міцністю і щільністю матеріалу [10]

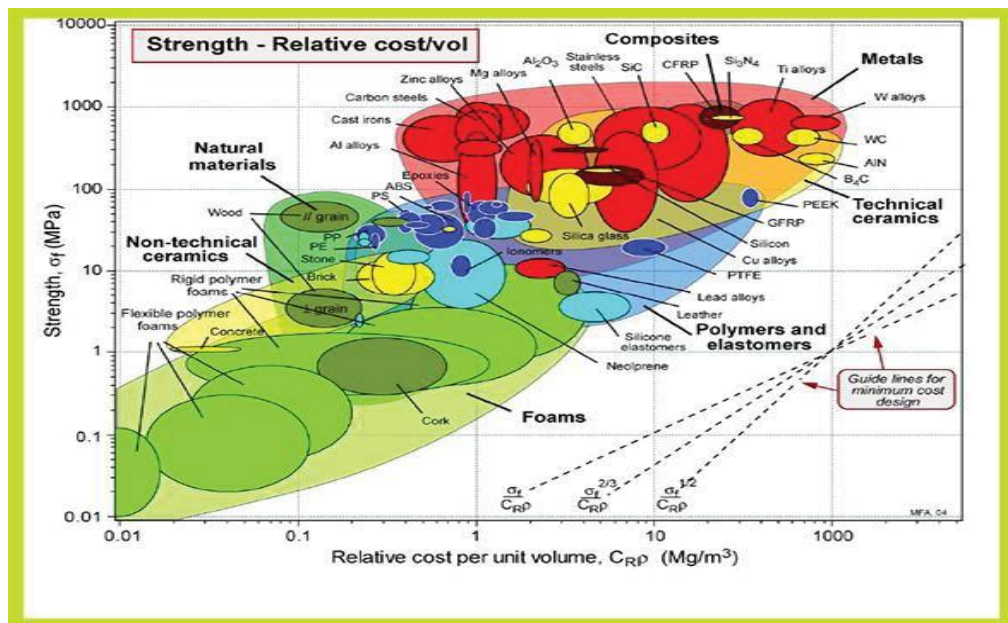


Рисунок 4.2 – Графік між міцністю та відносними витратами на одиницю об'єму [10]

Сталь, чавун і алюміній найчастіше використовуються для рук і основ робіт. Алюміній є більш м'яким матеріалом, тому з ним легко працювати. Але сталь міцніша в кілька разів. Було вирішено розробити деталі з алюмінію. Це не був прямий відбір. Деталь 1 має більшу вагу порівняно з іншими частинами. Решта деталей не заземлені і необхідні для того, щоб нести деяку вагу інших рук і кінцевого ефектора також листа в цьому випадку. Отже, вони не можуть бути важчими за основу, що може завдати шкоди деталі 1. Було вирішено присвоїти алюміній усім частинам, включаючи частину 1.

Звичайно, завжди є вибір змінити матеріал. Цей вибір виявився хорошим, оскільки алюміній добре підійшов для деталей 1,2,3 і 4. Але, в протилежному випадку, було вирішено віднести до деталей нержавіючу сталь. Лише частина 5 показала меншу несучу здатність з алюмінієм, але була спроба змінити матеріал на CFRP (полімер, армований вуглецевим волокном). Причина цього в тому, що це міцніший і легший матеріал, ніж алюміній. Не має можливості призначити матеріал з більшою щільністю. Зі збільшенням щільності збільшення ваги і збільшення ваги частини 5 може

мати поганий вплив на інші руки. Експеримент спрацював, і деталь 5 збільшила свою місткість на рис. 4.3.

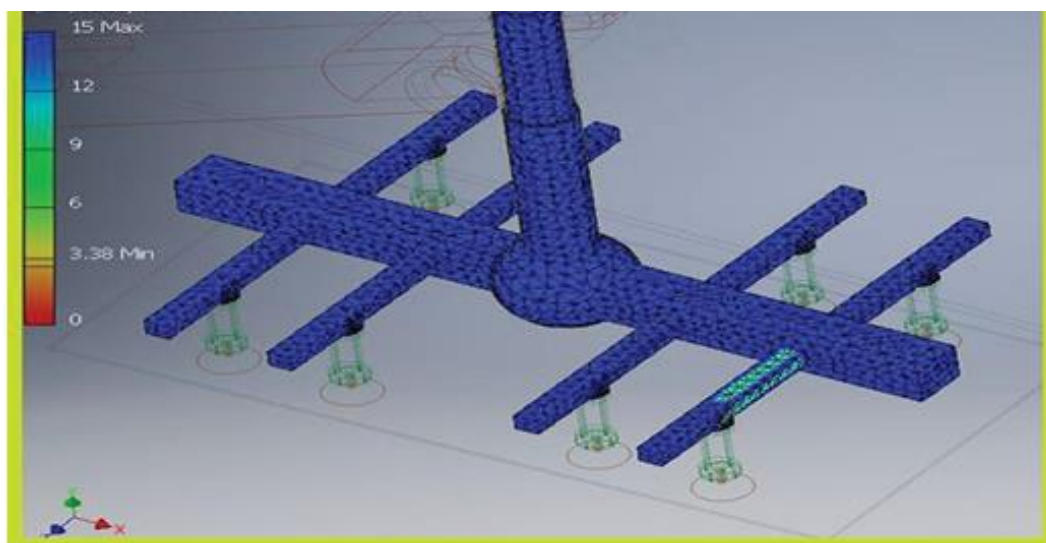


Рисунок 4.3 – Частина-5 призначена з матеріалом CFRP

Єдина проблема з CFRP полягає в тому, що він відносно дорогий. Але знову ж таки, підбір матеріалів – це зовсім інше дослідження. Було обмежено дослідження вимогами до використання в галузі. Матеріалом, що використовується для більшості деталей роботизованої руки, є сплав алюмінію 6061 [11].

Алюміній 6061 – це загартований атмосферними опадами алюмінієвий сплав, що містить магній і кремній як основні легуючі елементи. Він має хороші механічні властивості, демонструє хорошу зварюваність і дуже часто екструдуються (поступається за популярністю лише 6063). Це один з найпоширеніших сплавів алюмінію загального призначення. Механічні властивості 6061 сильно залежать від температури, або термічної обробки, матеріалу. Модуль Юнга становить 69 ГПа (10 000 ksi).

Відпалений 6061 (відпуск 6061-O) має максимальну межу міцності на розрив не більше 120 МПа (18 000 фунтів на квадратний дюйм), а максимальну межу плинності не більше 55 МПа (8 000 фунтів на квадратний

дьюм). Матеріал має подовження (розтягнення до остаточного руйнування) 25-30%.

#### 4.2 Проведення аналізу напружень

Про хорошу конструкцію завжди судять по її несучій здатності. У таких операціях, як транспорт, де використовуються машини, очікуємо, що вони будуть міцнішими за необхідність, щоб вони могли виконувати необхідну дію протягом тривалого часу.

Аналіз напружень – це інженерна дисципліна, яка використовує багато методів для визначення напружень і деформацій у матеріалах і конструкціях, що піддаються силам. В інженерії аналіз напружень часто є інструментом, а не метою. Кінцевою метою є проектування конструкцій і артефактів, здатних витримати задане навантаження, з використанням мінімальної кількості матеріалу або задовольняє якомусь іншому критерію оптимальності. Напряга на деталі може бути пов'язана з вантажопідйомністю. Як правило, відправною точкою для аналізу напружень є геометричний опис конструкції, властивості матеріалів, що використовуються для її деталей, спосіб з'єднання деталей і максимальні або типові сили, які передбачається прикладати до конструкції.

Результатом дослідження (аналізу) є опис того, як прикладені сили поширюються по всій конструкції, що призводить до напружень, деформацій і прогинів всієї конструкції і кожного компонента цієї конструкції. При аналізі можуть враховуватися сили, які змінюються з часом, такі як вібрації двигуна або навантаження транспортних засобів, що рухаються. У цьому випадку напруги і деформації також будуть функціями часу і простору. Як правило, розрахунок розподілу напружень раніше здійснювався за допомогою математичних засобів і методів скінченних елементів.

Але для розрахунку розподілу напружень більш доцільно потрібне більше число елементів в геометричній конструкції. Це збільшує

обчислювальний час і зусилля, оскільки робить це лише математичним способом. Тому було використано методи моделювання програмного забезпечення САПР, таких як Autodesk Inventor 2017, щоб виконати ці завдання та заощадити зусилля. Щоб створити хороше середовище моделювання, необхідно застосувати відповідні навантаження та граничні умови, щоб зробити модель максимально наближеною до реальності.

### 4.3 Навантаження та граничні умови

Роботизована рука має 5 суглобів, і кожен суглоб має лише один ступінь свободи (обертальний). Для цього необхідно вказати вісь, щоб кожен суглоб обертався навколо нього. Будь-які інші види рухів обмежені. Спосіб створення з'єднань пояснюється в розділі «Монтаж» у попередній частині документа. У цій області обговорюємо поведінку суглобів при навантаженнях і граничних умовах.

На рис. 4.4 показаний стик 2 вузлів. Суглоб вже визначено як ротаційний. Тепер, щоб деталь 2 оберталася, на вал деталі 2 повинен діяти момент. Момент імпульсу об'єкта може бути пов'язаний з кутовою швидкістю  $\omega$  об'єкта (з якою швидкістю він обертається навколо осі) за допомогою моменту інерції  $I$  (який залежить від форми і розподілу маси навколо осі обертання). Деталь 2 рухається від 230 градусів до 193 градусів проти годинникової стрілки протягом 37 градусів за дві секунди, що дає кутову швидкість 18,5 градусів/сек. Швидкості з'єднань зведені в табл. 4.1 для розрахунку моменту.

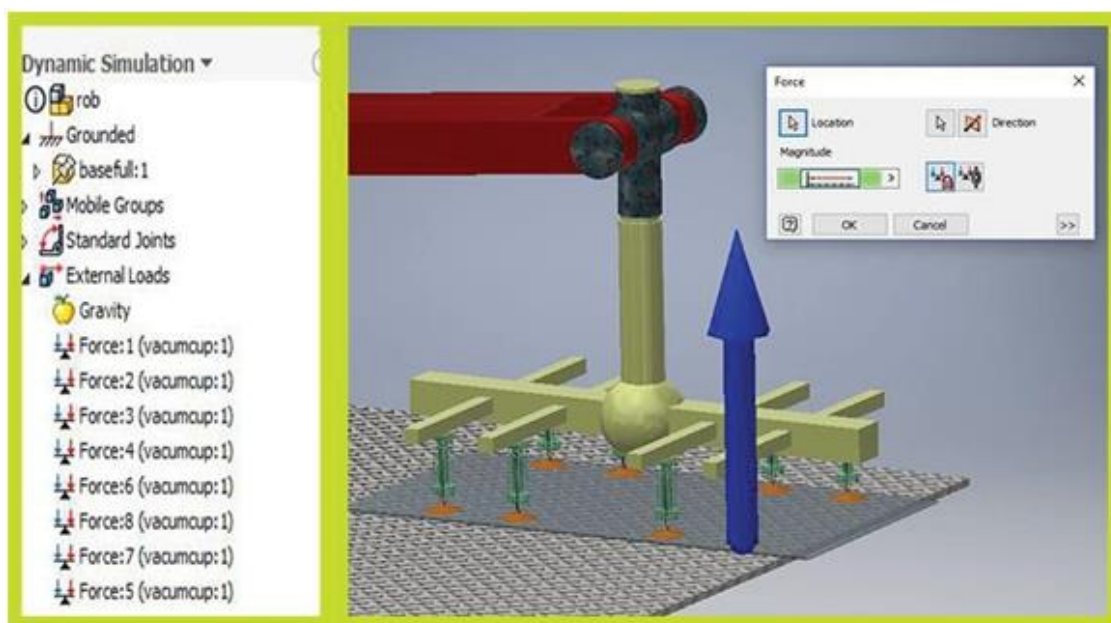


Рисунок 4.4 – Сила, що діє на лист

Таблиця 4.1 – Таблиця швидкостей всіх частин

Частина	Відправна точка, °	Кінцева точка, °	Витрачений час, сек	Швидкість, град/сек
1	360	270	2,5	36
2	230	193	2	18,5
3	168	178	5	20
4	186	214	1,2	23,3
5	360	270	2,5	36

Момент  $L$  можна обчислити за формулою  $L = I \times \omega$ , де  $I$  – момент інерції тіла, а  $\omega$  - кутова швидкість.

Винахідник сам виконує ці розрахунки і приймає момент для розрахунку. Поряд зі швидкостями з'єднань даємо навантаження на кінцевий

ефектор. Лист являє собою лист заліза з розмірами  $777 \times 400 \times 4$  мм, масою листа 3,35 кг і вагою 32,9286 Н.

На кінцевому ефекторі є 8 присосок. Вага листа діє вниз (за рахунок сили тяжіння). Присоски повинні створювати силу, яка долає силу тяжіння. Єдине зовнішнє навантаження, яке використовується в цій моделі, - це тиск, що діє на лист на присосках, щоб підняти лист вгору. Як вже було сказано раніше, феномен присоски вже практикується в галузі. Там тиск, створюваний на лист у напрямку проти сили тяжіння замиканням присосок, становить 3 бар.

У цьому випадку маємо 8 присосок. Цей тиск ділиться між 8 чашками і перетворюється на силу шляхом множення розділеного тиску на площу присоски.

Загальний тиск на лист дорівнює,  $P = 3 \text{ бар} = 300000 \text{ Па}$  Розділено на 8 чашок, тиск на кожну чашку становить,  $P_{cup} = 37\,500 \text{ Па}$

Площа присоски (обчислена на основі Creo) дорівнює,  $A_{sheet} = 0,00108 \text{ метра}^2$  Тепер сила, що створюється на кожній чашці, дорівнює,  $F = \text{тиск} \times \text{площа} = 40,5078 \text{ Н}$ .

Сила  $F$ , яка розрахована вище, є силою, яка діє проти сили тяжіння на одній присосці. На кінцевому ефекторі їх 8, тому сумарна сила проти сили тяжіння у 8 разів перевищує  $F$ .

Частина, що залишилася завантаження в даній моделі автоматично забирається зі збірки. Зовнішні навантаження вказуються окремо.

#### 4.4 Проведення аналізу напружень в збірці

Модуль динамічного моделювання надає лише засоби для вивчення та виправлення динамічної поведінки збірки. Було забезпечено навантаження, сили та обмеження, необхідні для роботизованої руки. Для кожної частини є певний час, і всі вони рухаються відповідно один до одного. Вся дія

відбувається за 7,5 секунд і рух вирішується для напруги в модулі аналізу стресу.

Як обговорювалося раніше, всі ці компоненти повинні бути експортовані в САПР для проведення стрес-аналізу. Для цього у є опція експорту у модулі «Динамічне моделювання». Все, що потрібно зробити, це вибрати частину, яку потрібно експортувати. Натисніть на експорт, а потім виберіть частину або кілька частин. Як тільки деталі будуть підібрані, відкриється вікно з проханням вибрати всі стики і контакти, пов'язані з ним. Наприклад, для експорту вибирається частина 2. Зв'язки, які маємо для частини 2, це спільна 2 і спільна 3. Вибираємо поверхні деталі 2, яка безпосередньо контактує зі стиком 2 і стиком 3. Результати можуть бути дуже поганими. Модуль експорту та відбір для частини 2 показані на рис. 4.5.

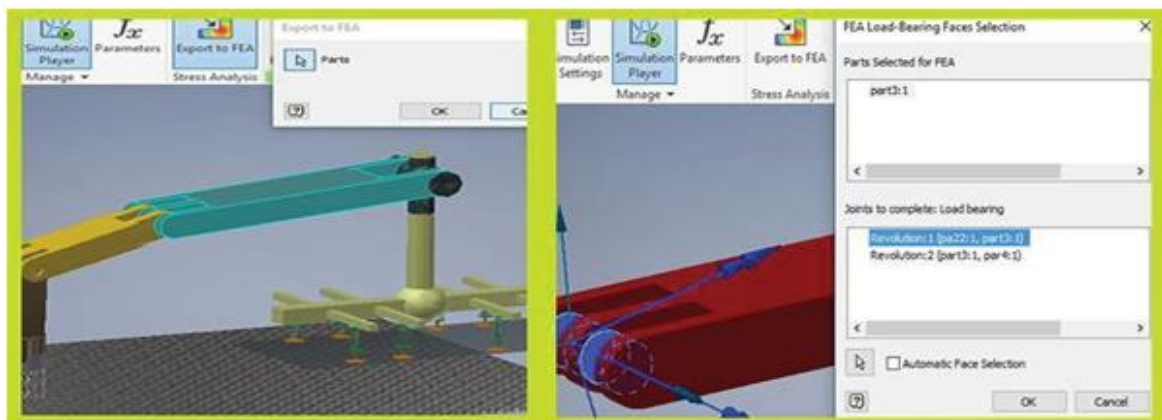


Рисунок 4.5 – Експорт моделі

Деталь 2 не має прикріплених зварних з'єднань. Незважаючи на те, що вибір однаковий для тих компонентів зі зварними з'єднаннями, наведемо приклад деталі 5, яка пов'язана зі з'єднанням 5 і має 8 поверхонь пневмоциліндра, приварених до неї (рис. 4.6).

Важливо, щоб компонент, який буде експортуватися, був гнучким. Це означає, що іноді для зручності збираємо різні компоненти в різних атмосферах складання, а потім об'єднуємо їх в одній атмосфері. Остаточний

вузол, який містить вузли, розглядає всі вузли як частини. Отже, щоб вибрати окрему деталь з підбірки, потрібно вибрати цю підбірку і клацнути на ній правою кнопкою миші, а потім вибрати опцію гнучкого на ній. Таким чином, було вибрано всі необхідні деталі, які експортуються в модуль Стрес-аналіз в Autodesk Inventor.

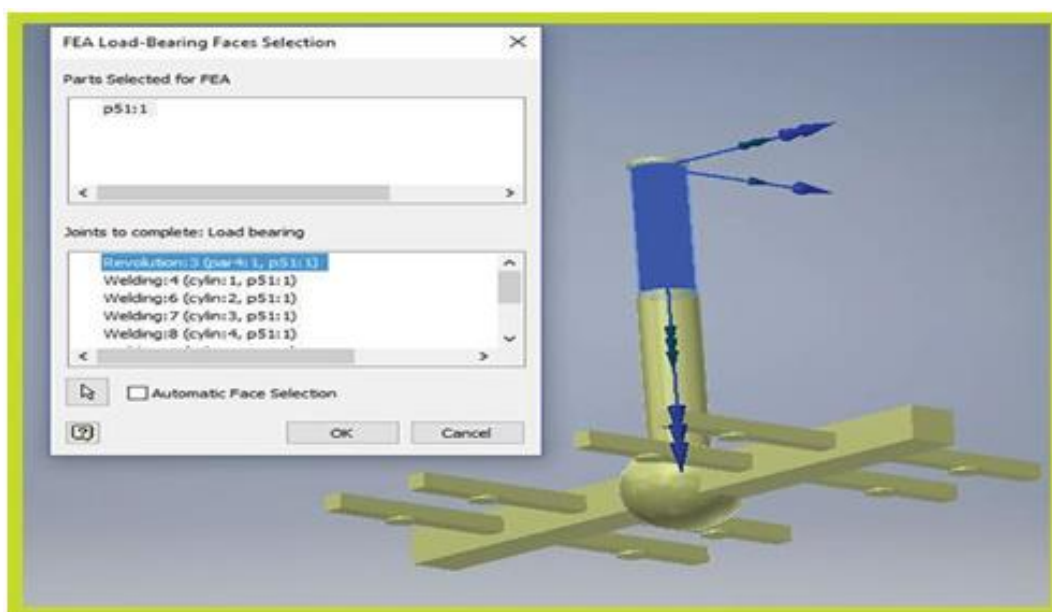


Рисунок 4.6 –Експорт частини 5

Після вибору запустіть симуляцію за допомогою симуляційного програвача. При цьому загальний часовий проміжок становить 7,5 секунд.

Після запуску симуляції відкрийте вивідний граф у верхній частині екрана. Там знаходимо опцію експорту. Натисніть на неї, і можна буде побачити частини, які вибрані для аналізу.

Тепер необхідно згенерувати часовий ряд. Клацніть правою кнопкою миші на опції часового ряду та виберіть опцію створення ряду. Відкриється вікно з кількістю кроків від 0 до 7.5. Можна вибрати будь-яку кількість часових кроків, відповідно до яких будемо аналізувати ці частини. У самому вихідному графі маємо всі стійкі групи, зварні групи та стандартні з'єднання, присутні в ньому. Клацніть будь-який з суглобів, виберіть будь-який наявний

там параметр, наприклад, положення, швидкість і прискорення цього суглоба.

Запустіть симуляцію, і ви зможете побачити шлях цієї конкретної фізичної величини протягом усього часу виконання симуляції. Що підводить до точки, швидкостей або крутних моментів, які призначені для суглобів, з якими вони рухаються (рис. 4.7).

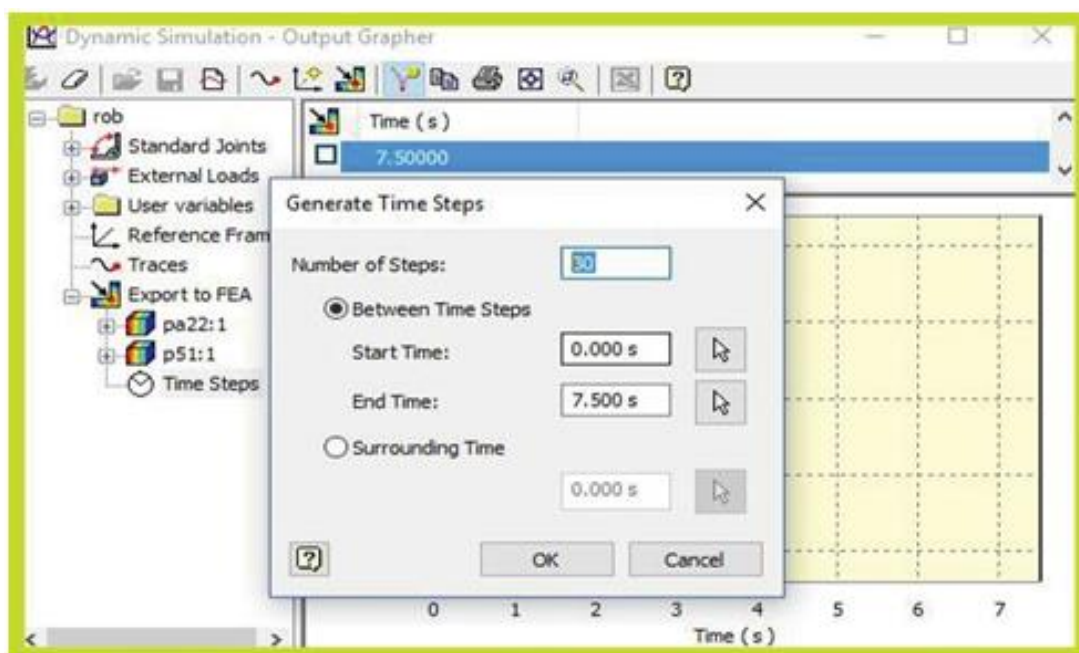


Рисунок 4.7 – Графік виводу та часовий ряд

Тепер вийдіть з модуля динамічного моделювання та перейдіть до модуля середовища. Перейти до аналізу стресу. Створіть робочий кабінет, виберіть опцію руху навантажень. Ця опція надає можливість вибрати певну деталь в конкретний час. Ось, наприклад, вибрали частину 2, яка буде симулюватися за 1,5 секунди. Виберіть цей час або будь-який крок ближче до цього значення. Натискаємо ОК, і входимо в середовище стрес-аналізу. Тут деталь, яку збираються змоделювати, виглядає такою, якою вона є, але всі інші частини в збірці зникають. Також бачимо жовті стрілки по всьому малюнку. Кожна стрілка позначає навантаження або силу, що діє на це тіло.

Всі дані генерується за допомогою динамічного моделювання. Тепер призначаємо матеріали для деталей тут.

Натисніть на розділ матеріалів, перейдіть до призначення матеріалів і дайте кожній частині бажаний матеріал. Тут даємо алюміній для всіх деталей, крім присосок і листового металу. Присоскам надається гумовий матеріал, а листовому металу присвоюється чавун. Щільність матеріалу багаторазово збільшується з об'ємом деталі, автоматично надаючи масу деталі. Оскільки сила тяжіння також призначається, вага компонента також додається до секції навантажень. Всю цю роботу виконує саме програмне забезпечення.

#### 4.5 Створення сітки

Наступний етап – створення сітки. Перейдіть до елементів керування сіткою, відредагуйте розмір сітки та натисніть «Сітчастий вигляд». Сітка генерується. Тепер перевірте наявність оновлень геометрії, таких як контакти. За потреби оновіть контакти та запустіть симуляцію. Тепер підійшли до найцікавішої частини – інтерпретації результатів.

Зачеплення сконструйованого шарнірно-маніпуляційного робота виконується дуже обережно, щоб досягти хорошого розподілу напруги. Напруги, що виникають тут, дуже високі, і ці напруги розвиваються за рахунок згинальних навантажень на круглих і гострих кутах. А завдяки ретельному вивченню шарнірно-зчленованого робота-руки, високі напруги, що генеруються, калібруються та характеризуються як відволікаючі діапазони.

За замовчуванням виконується зачеплення, надане винахідником, і деталь моделюється, після детального вивчення цього отриманого розподілу напружень. Було виявлено, що в деяких областях стрес більший, ніж у решті. Початкові розміри сітки становлять 0.1 мінімального розміру елемента, а середній розмір елемента – 0.2. Потім опція локальної області сітки, присутня у винахіднику, для вибору областей, які, як спостерігається, мають

високі напруження, і їх розміри елементів змінюються на 0,01 мінімального розміру елемента та 0,02 середнього розміру елемента.

Елемент керування локальною сіткою надає можливість редагувати щільність, якщо сіть у будь-якій вибраній області. Сітка сама підлаштовується під форму геометрії. Форма елемента є чотиригранною, і на завершальних етапах моделювання змогли переконатися, що кожна геометрія має принаймні 2 елементи. Сітчаста скінченно-елементна модель показана на рис. 4.8-4.9.

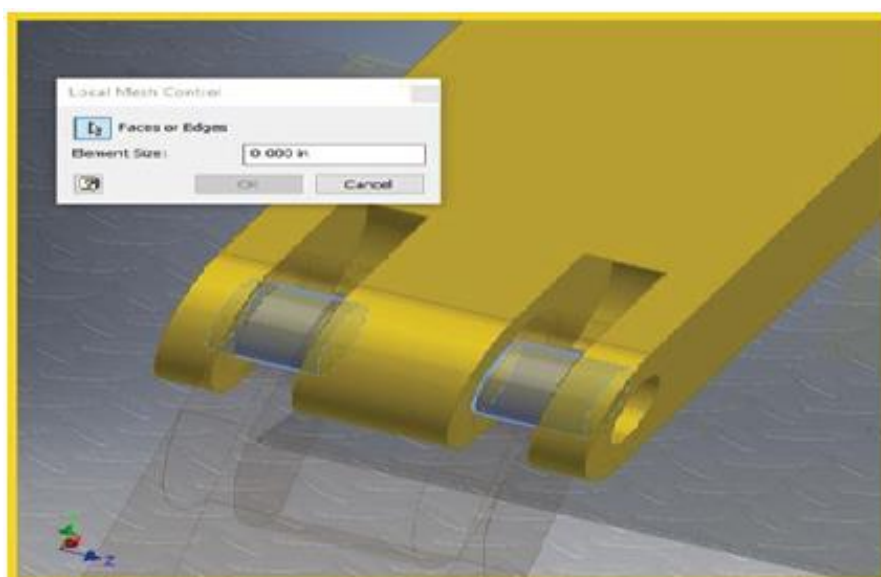


Рисунок 4.8 – Суглоб, де сітка збуджена

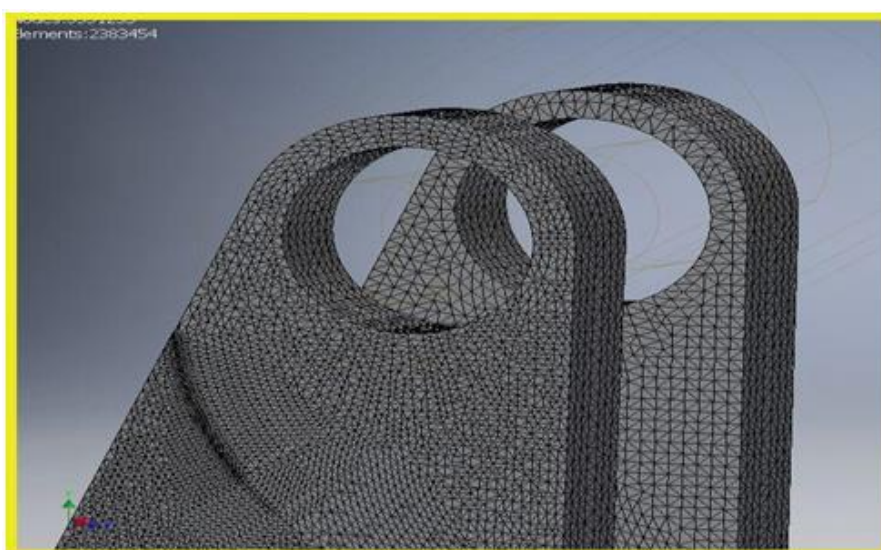


Рисунок 4.9 – Сітчаста частина

#### 4.6 Стрес-аналіз середовища

Аналіз кінцевих елементів в Autodesk Inventor стає дуже простим, коли збірка правильна, а об'єднані зусилля, навантаження та обмеження

дано належним чином. Описані з'єднання та деталі, а спосіб їх збирання пояснюється в попередньому розділі. У цьому розділі буде обговорено аналіз скінчених елементів, виконаний Autodesk Inventor на роботі. Для цього було експортовано деталі з модуля динамічного моделювання до модуля аналізу напружень [12]. Рух кожної частини роботизованої руки попередньо завантажується та експортується до модуля інженерного аналізу.

Набір обмежень дуже важливий для будь-якого структурного аналізу будь-якої фізичної структури. Якщо у є навантаження, що діє на тіло, то повинна бути реакція цього навантаження на це тіло. Фізичні обмеження визначають цю реакцію. Для прикладу розглянемо консольну балку з навантаженням, що діє на її вільний кінець. Природно, деформація буде більше на вільному кінці. Але його реакція вивчається в обмеженому кінці. Отже, міцність і жорсткість цієї балки для цього матеріалу вивчається [13].

Аналогічно, обмежуємо компоненти роботизованої руки відповідно до необхідного використання. Кожна рука в роботі задіяна як мінімум в одному суглобі. Незважаючи на те, що з'єднання не змінюються в процесі роботи, орієнтація напружень на компонентах змінюється внаслідок їх руху в даний час. Inventor надає можливість переміщення навантажень в модулі аналізу напружень. Де аналізується кожну деталь у будь-який проміжок часу, включаючи зовнішні навантаження, навантаження на тіло та силу тяжіння. Просто необхідно згенерувати часовий ряд з кількістю часових кроків між ними. У цьому випадку було зроблено 25 часових кроків від 0 до 7,5 секунд. Вибираємо 6 часових точок, де відчуваємо, що зміна напружень і переміщень можна спостерігати чітко. Завантаження в даній моделі автоматично знімається зі збірки. Напруга аналізується динамічно, оскільки повинні знати, як коливаються напруги в деталі під час її руху.

Навантаження і граничні умови змінюються і виправляються всякий раз, коли відбувається зміна положення або кроку в часі.

#### 4.7 Аналітична модель

Ручні розрахунки в цьому випадку виконуються лише для того, щоб перевірити, чи йде моделювання відповідно до теорії твердої механіки. Оскільки створити 3D-модель за допомогою ручних обчислень дуже важко і складно, завжди необхідно віддавати перевагу програмам моделювання (наприклад, Autodesk Inventor 2017). Але для того, щоб перевірити, чи правильні задані граничні умови і створене середовище, спробували встановити рівняння деформації для частини в моделі. Тут порівняємо обчислене значення зі зміщенням (деформацією) в x-напрямку при моделюванні.

Для цього беремо деталь-2, щоб провести на руці розрахунки з в. В цьому випадку мало змін в геометрії цієї деталі, наприклад, було проігноровано прогаліни і отвори в геометрії, а Хейвен взяв, що вона має суцільну лінійну балку з рівномірним поперечним перерізом. Береться криволінійний перетин, що має пряму лінію. Розміри деталі-2 наведені нижче.

$$\text{Об'єм } V = 0,00359787 \text{ метрів}^3.$$

$$\text{Щільність } \rho = 2700 \frac{\text{кг}}{\text{метрів}^3}.$$

$$\text{Маса } M = \text{об'єм} \times \text{щільність} = 9,714 \text{ кг.}$$

$$\text{Вага } q = \text{маса} \times g = 95,29\text{N.}$$

$$\text{Довжина } L = 0,45 \text{ метра.}$$

$$b = 0,153 \text{ і } h = 0,08.$$

Теорія балок Ейлера-Бернуллі є спрощенням лінійної теорії пружності, яка дозволяє обчислювати несучі та прогинаційні характеристики балки. Почнемо з диференціального рівняння відхилення 4-го порядку і виведемо

рівняння 1-го порядку. Для цього робимо положення балки на 0,5-й секунді і приймаємо її як просто опорну балку, з закріпленими обома кінцями [13].

Граничними умовами балки з простою опорою є  $w(0) = 0$ .

Оскільки балка прикріплена до опори, балка не може відчувати прогин на лівій опорі  $w(L)=0$ .

Балка також закріплена на правій опорі  $w''(0) = 0$ .

Що стосується консольної балки, то ця гранична умова говорить про те, що балка вільно обертається і не відчуває ніякого крутного моменту. У реальному житті зазвичай є невеликий крутний момент через тертя між балкою та її штифтом, але якщо штифт добре змащений, цей крутний момент можна проігнорувати  $w''(L)=0$ .

Таким же чином балка не відчуває і згинальних моментів на своєму правосторонньому кріпленні. Рівняння променя Ейлера-Бернуллі подається у вигляді

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{q}{L} (x). \quad (4.1)$$

При інтегруванні рівняння променя Ейлера-Бернуллі отримаємо похідні рівняння наступним чином.

$$EI \frac{d^4 w}{dx^3} = \frac{q}{L} \times \frac{x^2}{2} + c_1, \quad (4.2)$$

$$EI \frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{q}{L} \times \frac{x^3}{6} + c_1 x + c_2, \quad (4.3)$$

$$EI \frac{dw}{dx} = \frac{q}{L} \times \frac{x^4}{24} + c_1 \frac{x^2}{2} + c_2 x + c_3, \quad (4.4)$$

$$EI \times w(x) = \frac{q}{L} \times \frac{x^5}{120} + c_1 \frac{x^3}{6} + c_2 \frac{x^2}{2} + c_3 x + c_4. \quad (4.5)$$

Тепер розглянемо, що навантаження, що діє на балку, розподіляється рівномірно. Отже, для обчислення навантаження в певній точці на балці використовується функція

$$\frac{q}{L}(x),$$

де ( $x = 0,1$  до  $L$ )

Застосовуючи граничні умови в наведеному вище рівнянні (4.4), отримаємо значення констант за допомогою програмного забезпечення MATLAB як.

$$C1 = -71,4726, C2 = 0, C3 = 1,6885, C4 = 0.$$

Розв'язавши цю проблему в MATLAB, вийшли на графік, що показує максимальну деформацію в центрі.

Отримане значення становить  $5,3 \times 10^{-7}$  м, але отримане значення в центрі променя при моделюванні деталі -2 становить  $6,83 \times 10^{-7}$  м, що близько. Але якщо придивитися уважніше, то прогин, отриманий при ручному обчисленні, буде меншим, ніж той, який було отримано при моделюванні.

Причин для цього багато, це може бути завантаження, тому що завантаження дуже приблизне для зручності розрахунку. У той час як середовище моделювання може мати більш реалістичне завантаження. Іншою причиною може бути матеріал (щільність). Для математичної моделі було проігноровано всі паї та отвори і прийняли балку як звичайну суцільну балку, але там, де вона має кілька канавок і отворів, більший матеріал (щільність) означає менше прогину. З огляду на всі ці спостереження і результати, можна сказати, що проведене моделювання наближене до реальності і є логічним.

## 4.8 Результати стрес-аналізу

Кінцева мета будь-якого аналізу полягає в тому, щоб дозволити порівняти розроблені напруження, деформації і прогини з тими

, які допускаються критеріями проектування. Таким чином, всі конструкції і компоненти, очевидно, повинні бути спроектовані таким чином, щоб мати потужність, більшу, ніж та, яка, як очікується, буде розвиватися під час використання конструкції, щоб уникнути руйнування.

Напруга, яка розраховується для розвитку в елементі, порівнюється з міцністю матеріалу, з якого виготовлений елемент, шляхом обчислення відношення міцності матеріалу до розрахункового напруження.

Але перед моделюванням потрібно вміти з'ясувати, де відбувається максимальне відхилення в частині, якщо у вас є інформація про граничні умови. Наприклад, якщо я бачу консольну балку з вантажем, що діє на неї вниз, я можу з'ясувати, що максимальне відхилення буде на вільному кінці, а на нерухомому кінці буде присутня сила реакції, що діє протилежно навантаженню.

Аналогічно відомо граничні умови і навантаження, що діють на кожну деталь на кожному такті часу. Тому є певне уявлення, де буде максимальне відхилення.

Autodesk Inventor дає розподіл напруги або деформації по деталі в конкретний момент. Якщо мені потрібен розподіл напруги на певному часовому кроці, скажімо, на 4,3-й секунді, я можу відредагувати властивості дослідження, змінити часовий крок і повторно змоделювати його.

Отже, просто для того, щоб зрозуміти поведінку стресів у циклі та з'ясувати, де напруги максимальні чи мінімальні в циклі, було знайдено спосіб. У вихідній графі в модулі динамічного моделювання Autodesk Inventor можна знайти дерево моделі всіх деталей, з'єднань, стабільних частин, сил, розташованих там. При натисканні на будь-яку з них з'являється можливість переглянути свій сюжет з часом. Тут приходимо до стиків і

вибираємо стик. Якщо зробити розімкнення цього суглобу, то зможемо знайти підстовпчики положення, швидкості, прискорення, накладеної сили та моменту, кожна з яких має свій графік проти часу протягом усього циклу. Вибираємо графік моменту.

Відомо, що,

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{\rho}, \quad (4.6)$$

де  $M$  – момент,

$E$  – це модуль Юнга матеріалу,

$I$  є моментом інерції,

$\rho$  – це щільність матеріалу

Напруження, позначене  $\sigma(y)$  можна записати у вигляді наступного рівняння:

$$\sigma(y) = \frac{-E(y)}{\rho}. \quad (4.7)$$

Термін  $\frac{E}{\rho}$  замінено на  $\frac{M}{I}$  дає

$$\sigma(y) = \frac{-M(y)}{I}. \quad (4.8)$$

У наведеному рівнянні момент інерції є постійною величиною, оскільки розміри деталі залишаються незмінними протягом циклу. Тому момент пропорційний стресу. Причому, якщо розглядати будь-яку деталь роботизованої руки, то максимальний прогин завжди знаходиться ближче до суглобів, тобто; на кінцях.

Момент обертової частини створює прогини на цих конкретних

ділянках. З огляду на всі ці причини, можна сказати, що сюжет «час– стрес» буде схожий на сюжет «час – момент».

Але, щоб підтвердити припущення, було надана наступна інформація. Графік часу і напруги частини 1 наведено на рис. 4.10.

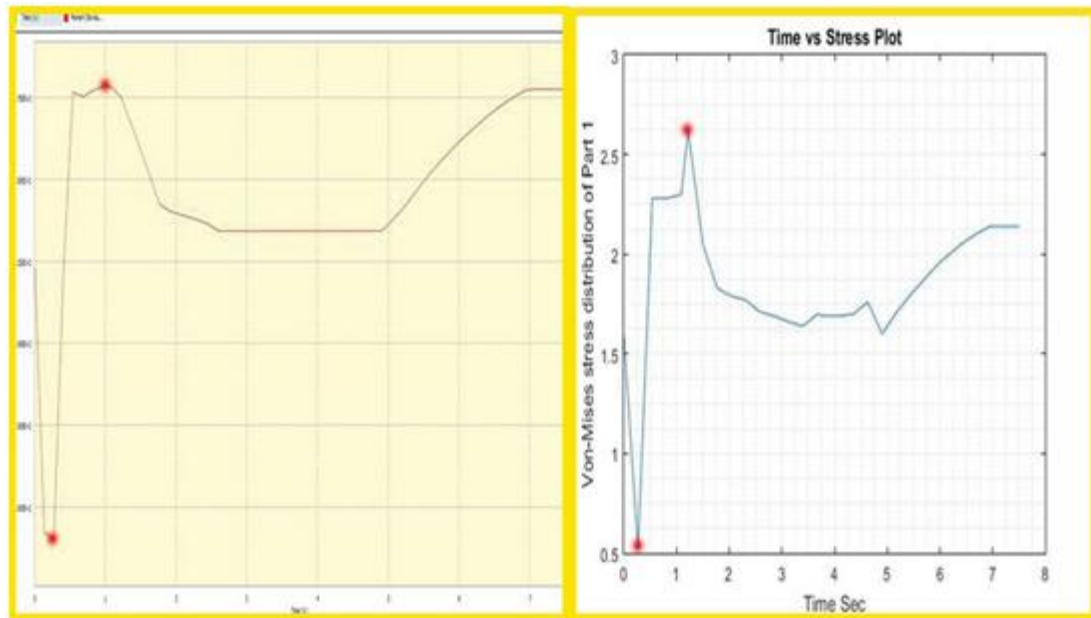


Рисунок 4.10 – Графік між часом (сек) і напругою частини

Було змодельовано деталь 1 у всіх 30 тактах часу і побудували графік отриманих максимальних значень напружень з тимчасовими кроками. І те, і інше показано на рис. 4.10 вони не зовсім схожі, тому що графік «Час проти стресу» генерується шляхом побудови графіка 30 часових кроків проти відповідних значень напруги в Matlab. Але графік, згенерований Inventor, більш тонкий і, безумовно, має більше 30 часових кроків. Таким чином, можна побачити більш плавну криву, ніж та, що генерується Matlab. Але, часові кроки, де максимальне і мінімальне значення. Виникають стреси і часові кроки, де діють максимальні і мінімальні моменти, однакові.

Це підтверджує припущення. Оскільки моделювання кожної частини протягом 30 разів і запис значень напружень є складним процесом, можна використовувати графіки часу проти моменту, щоб перевірити ті конкретні часові кроки, де напруги є максимальними та мінімальними.

Щоб перевірити це ще раз, також було виконано всі процеси, описані вище для частини 2. Але для Частини 5 застосовується інша процедура. На деталі 5 є 8 присосок, і сили, що діють на ці 8 чашок, однакові. Але зміна положення листа з часом змінює поведінку сил - це моменти на 5 частину. Але всі ці графіки «Сила – Час» та «Момент – Час» для Частини 5 мають свої пікові та найнижчі значення в одній точці для всіх присосок. Максимальний і мінімальний кроки часу можна знайти за допомогою тих цифр, які наведені нижче на рис. 4.11.

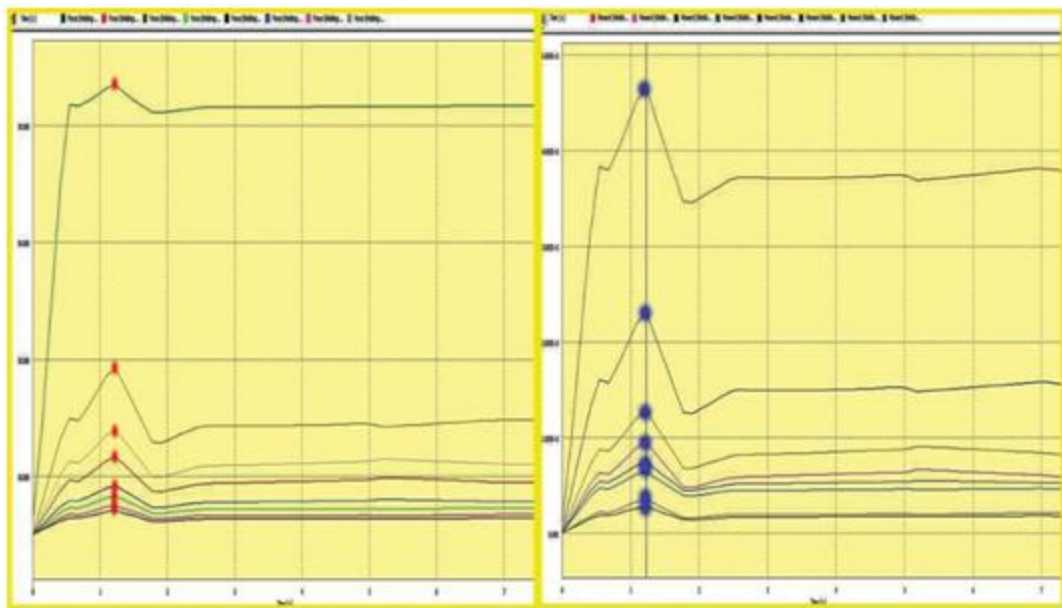


Рисунок 4.11 – Графіки між часом (сек) і силою і моментом.

На рис. 4.12 показаний розподіл напружень частини 1. Напряга, як і очікувалося, максимальне у верхній частині, де вона утворює з'єднання з деталлю 2. Деталь 2 має вал, який обертається всередині отворів, передбачених у верхній частині деталі 1. Рух деталі 2 викликає напруження на деталі 1 зверху. Також виникають стреси в іншій частині тіла. Повний синій колір не говорить про те, що стресів немає зовсім.

Розподіл цих діапазонів напружень за шкалою можна редагувати за допомогою параметра кольорової діаграми у винахіднику. Зменшуємо максимальне значення і більш детально видно розподіл напружень.

Максимальне напруження на цій ділянці становить 2,101 KSI, що дорівнює 14,48 МПа.

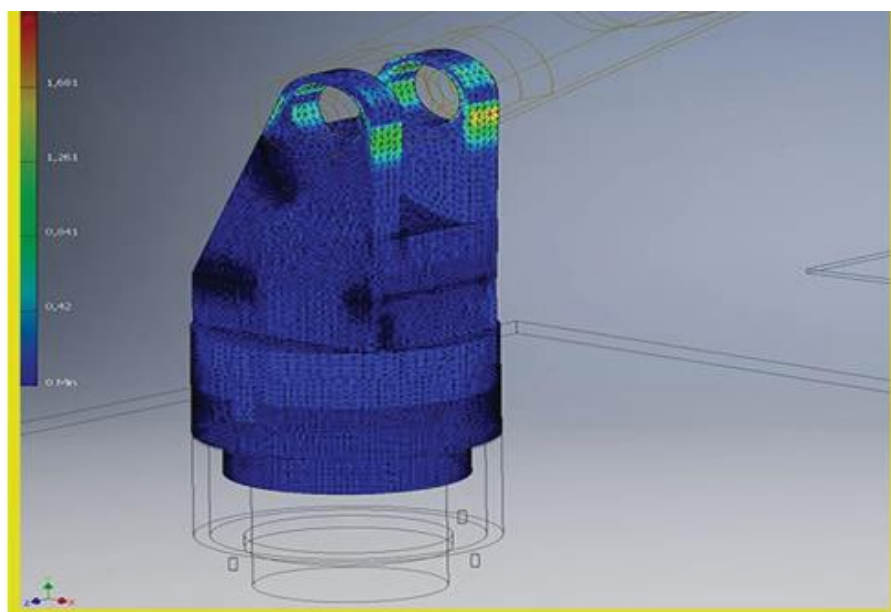


Рисунок 4.12 – Графік розподілу напружень частини 1

Аналогічно, як показано на малюнку (розділ навантаження) в розділі Навантаження, Деталь 2 також з'єднується з деталлю на обох її кінцях. Правий кінець Частини 2 з'єднаний з Частиною 3. Таким чином, момент на валу деталі 3, який змушує його обертатися, впливає на прогин у частині 2. Також Частина 2 пов'язана з Частиною 1. Так, максимальні значення напружень розвиваються на обох кінцях Деталі 2.

Таким же чином Деталь 3 також з'єднується з деталлю на кожному кінці. Сили, які діють у частині 3, схожі на частину 2. Найважливіше спостереження з малюнків розподілу напружень тут полягає в тому, що критичні ділянки (де напруги максимальні) виявляються в кінці як Частини 2, так і Частини 3, а не десь посередині. Як вже було обговорено раніше, очікуємо, що критичні ділянки будуть на кінцях через навантаження на кінцях. Якщо раптом критична область буде помічена в середині Частини 2 або Частини 3, це може бути погано. Це пов'язано з тим, що, якщо напруги спостерігаються максимум на тих ділянках, де навантаження не більше, це

означає, що розподіл напружень цієї конкретної геометрії не є правильним і, як правило, скоро виходить з ладу.

Зображення розподілу для Частини 2 та Частини 3 показані нижче рисунків 4.13 та 4.14. Максимальне напруження, вказане в частині 2, дорівнює 2,425 KSI, що дорівнює 16,71 МПа. Максимальне напруження, знайдене в частині 3, становить 4,607 KSI, що дорівнює 31,76 МПа.

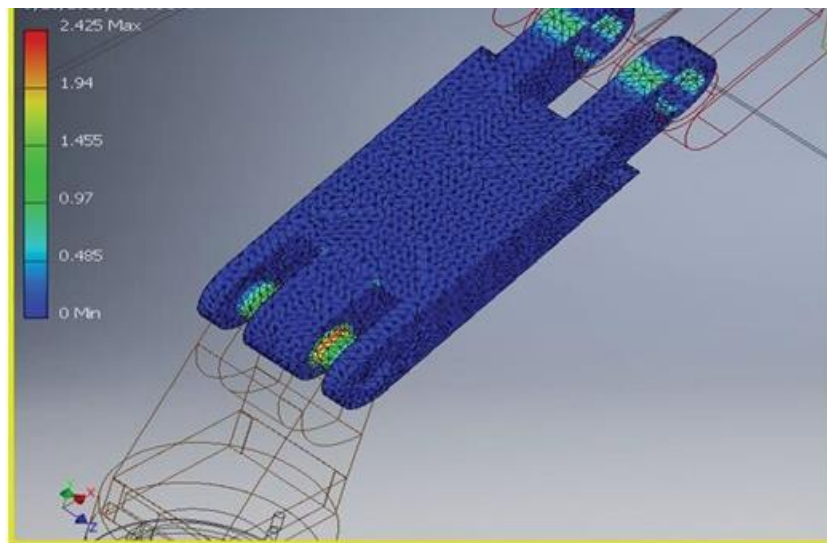


Рисунок 4.13 – Розподіл напружень частини 2

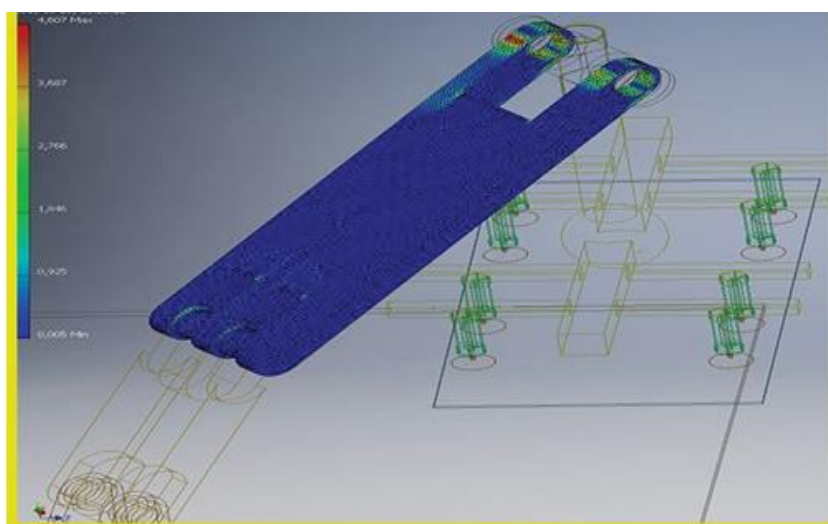


Рисунок 4.14 – Розподіл напружень частини 3

Частина 4 і частина 5 є кінцевим ефектором. Частина 4 показана на рис. 4.15 є меншою деталлю в порівнянні з розміром решти частин. Він підвішений в кінці деталі 3 і обертається всередині отворів на правому кінці

деталі 3. У нього є 2 роботи. По-перше, нести вагу кінцевого ефектора і рухатися відповідно до Частини 2 і Частини 3. Друге завдання полягає в тому, щоб допомогти обертанню кінцевого ефектора навколо власної осі. Природно, що в міру того, як навантаження діє на його центр, очікується, що деформація буде більше в центрі. Бічні сторони зазнають меншої деформації в порівнянні з центрами. Максимальне напруження на цій ділянці, показане на рис. 4.15, визначено 0,235 KSI, що дорівнює 1,67 МПа.

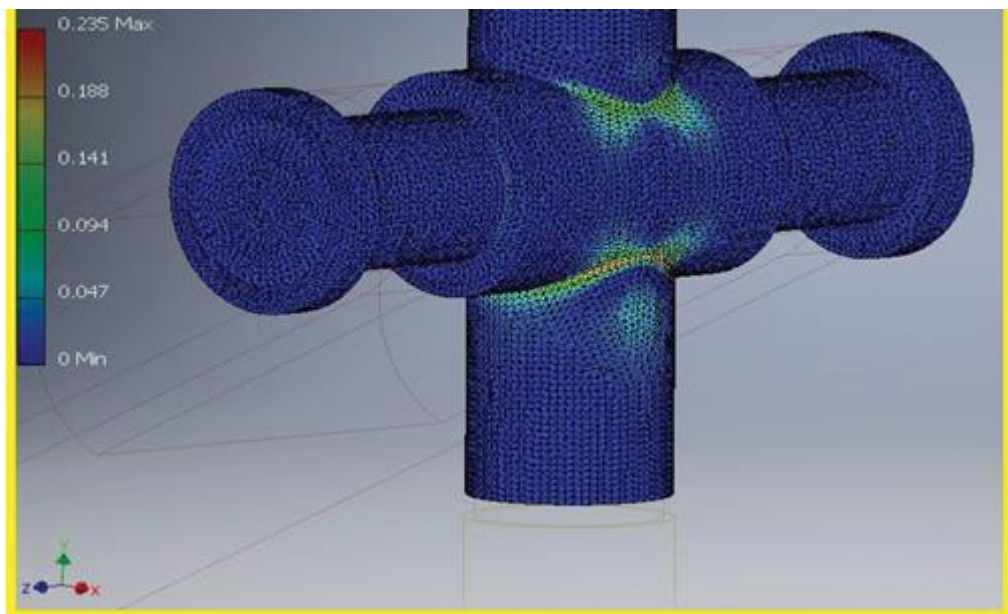


Рисунок 4.15 – Розподіл напружень частини 4.

Частина 5 є основою кінцевого ефектора. Єдиний обов'язок він повинен тримати на аркуші. Так, максимальний ефект, створюваний пневмоциліндрами і листом, видно саме на цій деталі. У цій частині багато попередньо оброблених напружень, оскільки є припущення, що пневмоциліндри приварені до цієї деталі (просто для блокування глибини різкості циліндрів). Але ці циліндри збираються за допомогою гвинтів і гайок. При чіткому спостереженні можна побачити, що кінцевий ефектор забезпечений основами з отворами та різьбовими стрижнями лише для того, щоб циліндри могли сидіти всередині. Через зварні з'єднання, створені на цій деталі, значення напружень, які генеруються цим моделюванням, можуть

бути трохи більшими, ніж значення. Розподіл напружень деталі 5 показано на рис. 4.16.

Максимальне спостережуване напруження становить 15,63 KSI, що дорівнює 107,13 МПа.

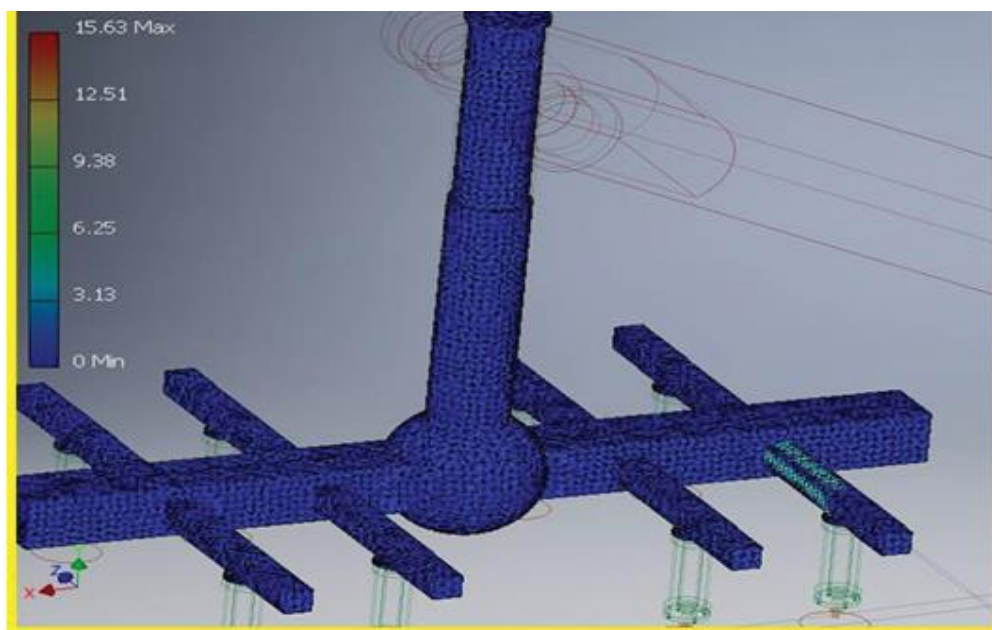


Рисунок 4.16 – Розподіл напружень частини 5

Тепер у є дані розподілу напруги для всіх 5 основних частин, але щоб знати, безпечні ці напруги чи ні, необхідно їх перевірити. Для виконання цього завдання було використовано концепцію фактора безпеки. Але перш ніж перейти до цього, значення напружень, показані разом з цими цифрами, знаходяться на одному конкретному часовому кроці. Але, весь процес за 7,5 секунд. Вони також змінюватися в залежності від часу, і цей момент вже був пояснений разом з сюжетом «Час проти моменту» раніше в цьому розділі. Щоб дізнатися, де відбувається максимальне і мінімальне напруження у всьому циклі, необхідно скористатися графіками часу проти моменту всіх частин і виділимо максимальні і мінімальні часові кроки в цих графіках. Ці значення зведені в таблицю нижче в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Таблиця максимальних і мінімальних напружень

Частина	Максимальне напруження, МПа	Час, при якому виникає максимальне напруження, сек	Мінімальне напруження, МПа	Час, при якому виникає мінімальне напруження, сек
1	15,72	0,54	14,14	0,136
2	20,408	0,54	4,52	0,136
3	4,136	1,09	1,31	0
4	6,51	1,09	0,387	0
5	15,92	1,22	4,49	0

Коефіцієнт безпеки – це термін, що описує несучу здатність системи понад очікувані або фактичні навантаження. По суті, фактором безпеки є те, наскільки система міцніша, ніж зазвичай потрібно для передбачуваного навантаження.

Коефіцієнти безпеки часто розраховуються за допомогою детального аналізу, оскільки комплексні випробування недоцільні на багатьох проектах, таких як мости та будівлі, але здатність конструкції витримувати навантаження повинна бути визначена з розумною точністю. Багато систем цілеспрямовано побудовані набагато міцніше, ніж потрібно для нормального використання, щоб врахувати аварійні ситуації, несподівані навантаження, неправильне використання або деградацію.

Фактором запасу міцності є відношення напруги плинності та робочого напруження. Він дає значення, яке дає вантажопідйомність деталі. Якщо коефіцієнт запасу міцності дорівнює 1, це означає, що конструкція може нести саме той вантаж, який потрібно нести. Якщо значення дорівнює 2, це означає, що він може нести вдвічі більше необхідного навантаження. Розглянемо коефіцієнт значень запасу міцності, що генеруються Inventor для всіх деталей.

Як бачимо, Частина 5 не така сильна, як очікувалося. Коефіцієнт безпеки, який він має, дозволяє йому нести лише навантаження листа, що добре для цього випадку, але очікуємо, що конструкція буде міцнішою

(рис. 4.17). Є багато способів зробити це сильнішим. Можна оптимізувати його та переробити відповідним чином, або можна спробувати інший матеріал.

Частина 5 є кінцевою частиною роботизованої руки. Частина 5 показала меншу несучу здатність з алюмінієм, але була спроба змінити матеріал на CFRP (полімер, армований вуглецевим волокном). Причина цього в тому, що це міцніший і легший матеріал, ніж алюміній. Не можна призначити матеріал з більшою щільністю. Зі збільшенням щільності збільшення ваги і збільшення ваги частини 5 може мати поганий вплив на інші руки. Експеримент спрацював, і частина 5 збільшила свою місткість.

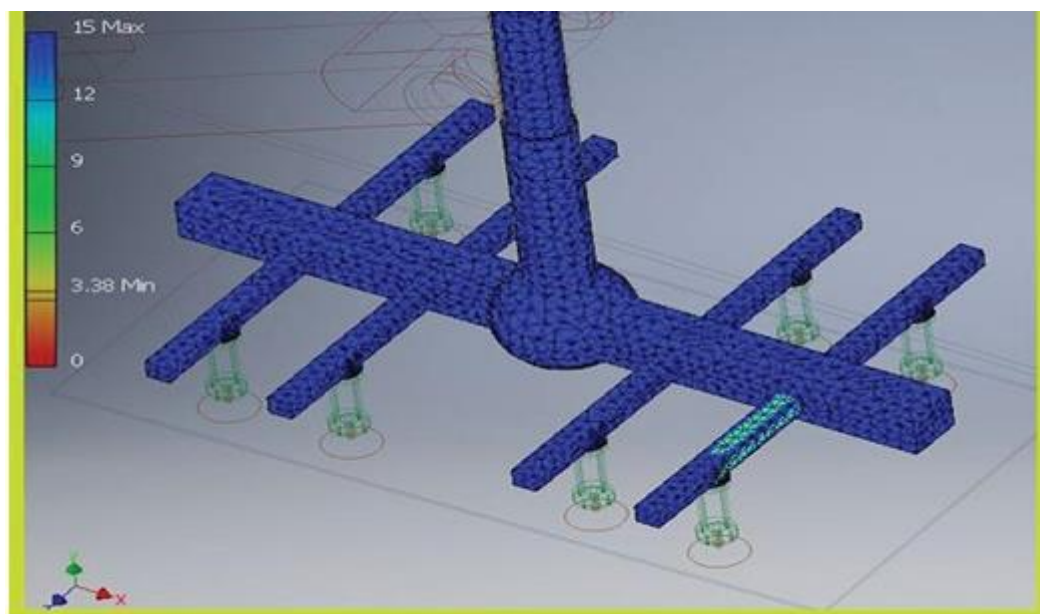


Рисунок 4.17 – Аналіз частини 5

Ці результати, які спостерігаються, є хорошими на даний момент. Модель може витримати вагу листа і при бажанні може взяти більше. Але це не можна сприймати як останнє слово. Процес, в якому буде використовуватися роботизована рука, є циклічним процесом. Один і той же вид навантаження застосовується до роботизованої руки багаторазово протягом тривалого періоду. Також треба перевірити приблизну кількість

циклів, які він може відпрацювати до того, як вийде з ладу. Це підводить до аналізу втоми роботизованої руки.

#### 4.9 Конвергенція

У процесі аналізу геометрії та розв'язання для аналізу необхідно точніше з'ясувати результати напружень. Щоб досягти цього, геометрія спочатку зазвичай сітчаста і моделюється. Потім вибираються ділянки з більшою концентрацією напруги, які дрібно сітчасті в порівнянні з попередньою сіткою. Після отримання результатів ділянки з більшою концентрацією напруги сітчасті дрібніше. Тут на кожному кроці розчину кількість елементів в сітці збільшується. Зі зміною налаштувань сітки, результати стрес-аналізу можуть змінюватися, і слід розуміти точність результатів напруження.

Виконання дослідження збіжності уточнює сітку та зменшує розмір елементів, що теоретично підвищить точність наступної ітерації результатів. У міру того, як сітчасті елементи зменшуються в розмірах, але збільшуються в кількості, зростають обчислювальні вимоги для розв'язання даної моделі. У міру того, як сітчасті елементи зменшуються в розмірах, вони досягають точки зменшення віддачі від рівня точності в порівнянні з обчислювальними накладними витратами і часом, необхідними для обчислення результату. Це означає, що моделювання вимагає більше часу для обчислення результатів, але результат може змінитися на незначне значення. Розв'язок називається збіжним, якщо значення напруження падає приблизно на одне й те саме число зі збільшенням кількості тимчасових кроків. Максимальні напруження для частини 2 порівнюються з кроками розв'язку на графіку, який наведений нижче. Відбувається значне збільшення числа елементів для збільшення кожного кроку розчину. Графік побудований за допомогою Matlab.

Графік можна побачити на рис. 4.18. Як видно з цього графіка, напруження змінюються зі збільшенням часових кроків (вісь X). Як вже

говорилося раніше, кількість елементів сітки збільшується з кроком часу. Це означає, що найвища пікова точка кривої має більшу кількість сітчастих елементів і тому може бути прийнята як результат, ближчий до точності. Як видно з графіка збіжності, останні два значення напружень на кривій дуже близькі один до одного, що робить криву лінійною вперед. Це є доказом того, що рішення сходиться, і це значення напруження можна прийняти за найбільш близьке значення до напружень в реальності. Значення напружень для кожного такту часу і кількість сітчастих елементів для кожного такту часу зведені в таблицю нижче в таблиці 4.3.

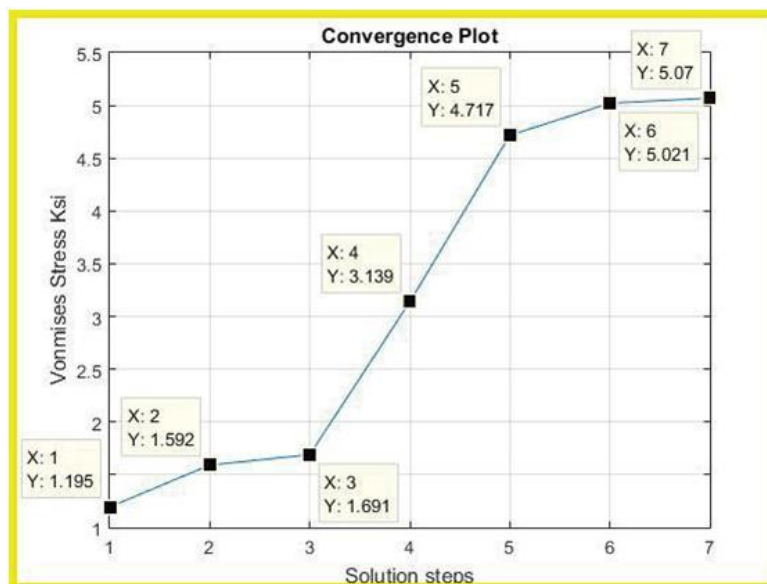


Рисунок 4.18 – Графік збіжності для частини 2

Таблиця 4.3 – Таблиця кількості елементів сітки та часових кроків

Часові кроки	Кількість елементів сітки	Максимальне напруження, МПа
1	1702	1.195
2	2051	1.592
3	4569	1.691
4	8988	3.139
5	22689	4.717
6	82850	5.07
7	271968	5.021

#### 4.10 Аналіз втоми матеріалу

Втома – це ослаблення матеріалу, викликане багаторазово прикладеними навантаженнями. Це прогресуюче і локалізоване структурне пошкодження, яке виникає, коли матеріал піддається циклічному навантаженні. Номінальні максимальні значення напружень, які спричиняють такі пошкодження, можуть бути набагато меншими, ніж міцність матеріалу, яка зазвичай вказується як межа напруги розтягування або межа межі текучості. Коли до матеріалу прикладаються циклічні напруги, навіть якщо напруги не викликають пластичної деформації, матеріал може вийти з ладу через втому.

Втомне руйнування, як правило, моделюється шляхом розкладання циклічних напружень на середню і змінну складові. Середнє напруження - це середнє в часі основного напруження. Визначення знакозмінного наголосу різняться в різних джерелах. Він визначається або як різниця між мінімальним і максимальним напруженням, або як різниця між середнім і максимальним напруженням. Інженери намагаються спроектувати механізми, деталі яких піддаються одному типу (згинальному, осьовому або крутильному) циклічних навантажень, оскільки це більше відповідає експериментам, які використовуються для характеристики втомного руйнування в різних матеріалах. Для цього необхідно мати приблизний період, коли можна бути оцінити, що матеріал або конструкція виходять з ладу після цієї великої кількості циклів.

Втомні збої зазвичай характеризуються як низькоциклові (1000 циклів). Порогове значення, що розділяє низько- і високоциклову втому, є дещо довільним, але, як правило, базується на поведінці сировини на мікроструктурному рівні у відповідь на прикладені напруження. Низькоциклові відмови, як правило, пов'язані зі значною пластичною деформацією.

Більшість металів з об'ємно-центрованою кубічною кристалічною структурою мають характерну реакцію на циклічні напруження. Ці матеріали мають порогову межу напружень, нижче якої не ініціюються втомні тріщини. Це порогове значення напруги часто називають межею витривалості. У сталях прийнято вважати, що термін служби, пов'язаний з такою поведінкою, становить  $2 \times 10^6$  циклів. Іншими словами, якщо даний напружений стан не викликає втомного збою протягом перших  $2 \times 10^6$  циклів, майбутній вихід компонента з ладу вважається малоімовірним.

Метали з кубічною кристалічною структурою з граней-центром (наприклад, алюміній, аустенітні нержавіючі сталі, мідь тощо) зазвичай не мають межі витривалості. Для цих матеріалів термін служби втомі продовжує збільшуватися в міру зниження рівня стресу; Однак, як правило, не досягається порогова межа, нижче якої можна очікувати нескінченного життя. Поведінка цих матеріалів, описані вище, можуть бути представлені за допомогою діаграми S-N, також відомої як крива Волера.

Це графік величини циклічного напруження (S) проти логарифмічної шкали циклів до відмови (N). На прогресування кривої S-N може впливати багато факторів, таких як корозія, температура, залишкові напруження та наявність зазубрин. Лінія Гудмана – це метод, який використовується для оцінки впливу середнього напруження на втомну міцність [14]. Дані тестів, потрапляють прямо з рештою даних при більш ніж  $10^3$  циклах. Деякі з даних про високий цикл отримані під час випробувань обертового променя. Відповідність даним втомі 6061-T6 була розроблена з використанням рівняння:

$$S = \frac{E}{4\sqrt{N}} \ln \left( \frac{100}{100-A} \right) + B, \quad (4.9)$$

де E – модуль пружності,

N – кількість циклів до відмови,

$S$  – амплітуда деформації, помножена на модуль пружності.

$A$  і  $B$  – константи, які вибираються для того, щоб рівняння відповідало даним. Зауважимо, що  $S$  трактується як напруга, заснована на припущенні про пружну поведінку. Однак він не представляє справжнього напруження при перевищенні діапазону пружності. У першому наближенні властивості втоми можна оцінити, взявши  $A$  як відсоткове зменшення площі при випробуванні на розтяг,  $A$ , а  $B$  як межу витривалості  $S$ . Слід зазначити, що алюміній не має межі витривалості.

$$S = \frac{14479}{\sqrt{N}} + 96.5 \text{ MPa}. \quad (4.10)$$

Крива показана з наявними даними випробувань без будь-якого середнього напруження на рис. 4.19.

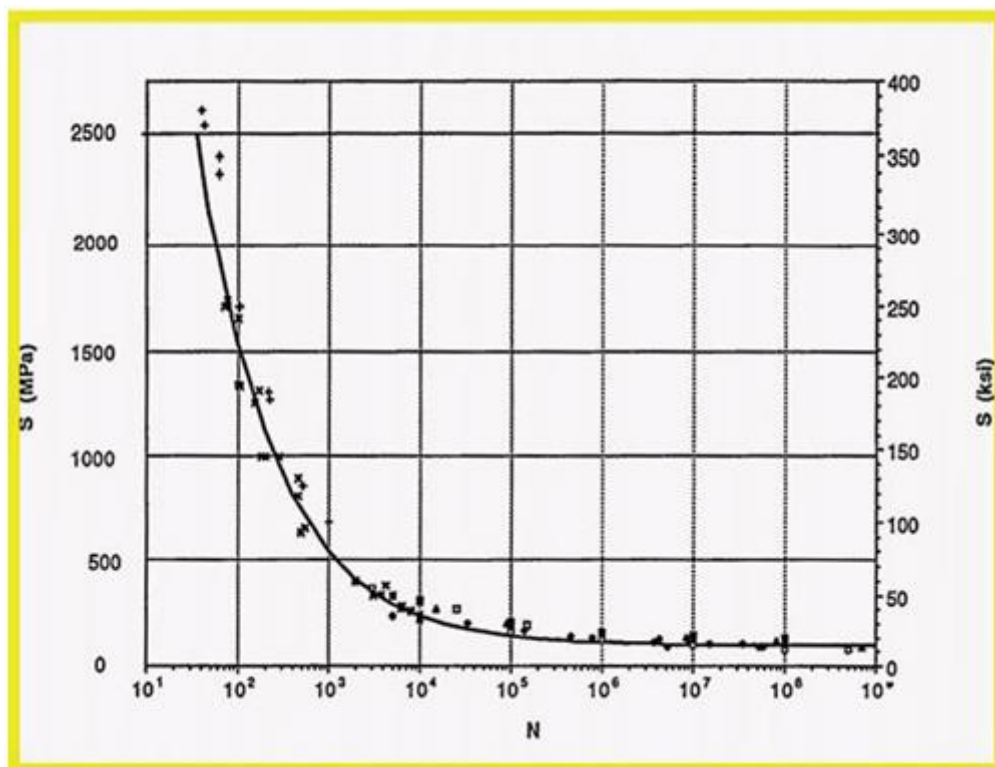


Рисунок 4.19 – Дані про втоми алюмінію 6061 з експериментів

Відношення Гудмена математично представлено у вигляді:

$$\frac{\sigma_{\alpha}}{\sigma'_e} + \frac{\sigma_M}{\sigma_u} = 1, \quad (4.11)$$

де  $\sigma_{\alpha}$  – змінний напруження,

$\sigma_M$  – середнє напруження,

$\sigma_u$  – граничне напруження,

$\sigma'_e$  – ефективне чергування навантажень.

Необхідно знайти кількість циклів до відмови однієї з деталей роботизованої руки, наприклад Деталь 2 з таблиці 4.3 тоді:

– максимальне напруження,  $\sigma_{\min} = 4,521$  МПа,  $\sigma_{\max} = 20,408$  МПа;

– діапазон стресів:  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ;

– почергове напруження  $\sigma_{\alpha} = \frac{\Delta\sigma}{2}$ ;

– середній стрес  $\sigma_M = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ .

Матеріал, який використовується для цієї деталі - алюміній. Дані, необхідні для розрахунку кількості циклів:

– межа міцності на розрив  $S_{ut} = 446$  МПа;

– міцність матеріалу при  $10^3$  циклах  $S_m = 0,95 \times S_{ut}$ .

Так як навантаженням, що діє на деталь, є навантаження на вигин, то постійна величина приймається за 0,95. Якщо це осьове навантаження, то постійна величина приймається за 0,75. Алюміній не має межі витривалості. Деякі конструкційні метали, такі як алюміній і мідь, не мають чіткої межі і в кінцевому підсумку виходять з ладу навіть від невеликих амплітуд напружень. У цих випадках вибирається кілька циклів (зазвичай 107) для представлення втомного терміну служби матеріалу [15].

Для створення та аналізу цієї системи будь-яку модель потрібно оптимізувати. Необхідно мати детальне пояснення того, який вплив може

мати на яку площу роботизованої руки, якщо змінити параметр, особливо параметри конструкції, такі як об'єм, товщина, матеріал.

#### 4.11 Висновки до розділу 4

Було проведено докладний аналіз матеріалів для виготовлення робота, крім цього було проведено аналіз напружень матеріалів. Тако було проведено стресс-аналіз середовища, зроблено аналітичну модель, було отримано результати стрес-аналізу, а також було зроблено конвергенцію та проведено аналіз втоми матеріалу

## ВИСНОВКИ

Основна причина, по якій варто зробити вибір на користь проектування роботизованої руки, в першу чергу, це транспортування листа від штабеля до стригальної машини. По-друге, у є обмеження простору в галузі. Штабель листів і машинка для стрижки знаходяться впритул один до одного. Вони знаходяться настільки близько, що будь-який інший вид транспорту, наприклад, лінійний робот (конвеєр), не може бути використаний. Це залишає єдиний вибір – створити роботизовану руку, яка може працювати в невеликих і перевантажених середовищах. У роботі показано розташування та положення штабеля та стригальної машини, і необхідно було розробити робот-маніпулятор, який підходить для цього середовища. Спостерігаючи за документом, можна побачити, що було перевірено роботизовану руку всіма можливими способами, такими як її несуча здатність, діапазон рухів, суглоби тощо. Демонстрацію руху роботизованої руки можна побачити на рисунках, наведених у додатку. Основне завдання полягало в тому, щоб сконструювати машину, яка вписується в навколишнє середовище і служить досягнутій меті. Але це не остаточний дизайн. У цій роботі було намагання охопити всі аспекти проектування і будівельного аналізу. Але все одно є великий шанс модернізувати машину.

Що стосується поточного дослідження, то було успішно визначені області, в яких напруги виникають найчастіше, і змогли показати, що ці напруги обмежені, а також не завдають значної шкоди маніпулятору робота. Аналіз напружень, який був виконаний, був нелінійним аналізом напружень, і вся геометрична нелінійність врахована в моделюванні. Це свідчить про те, що отримані напруги і деформації дуже близькі до реальності. Тривалість напівперіоду роботизованої руки в симуляції становить 7,5 секунд, це означає, що лист буде зібраний, транспортований і поміщений в пункт призначення за 7,5 секунд, що є швидким процесом. Ця швидкість може бути

несумісною в реальному житті в галузі. Можливо, доведеться трохи сповільнити процес.

Цей ліміт часу в 7,5 секунд не є несподіваним. Після безлічі коригувань, спроб, редизайнів дійшли до цього часу з 18 секунд до 7,5 секунд. Мотив змоделювати його на такій швидкості полягає в тому, що, якщо ця машина може витримувати рухові навантаження на високих швидкостях і при цьому бути безпечною, вона може бути хорошою машиною на нижчих швидкостях. Швидкість завжди може бути відрегульована користувачем.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП “УкрНДНЦ”. 2016. 30 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп’ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп’ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. 65 с.
3. Sun, L., Liang, F., & Fang, L. (2019). Design and performance analysis of an industrial robot arm for robotic drilling process. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 46(1), 7-16.
4. FANUC America Corporation (2016) Automated Bottle Pallet Unloader with FANUC Pick & Place Robot – Clear Automation.
5. Daniyan, I., Mporfu, K., Ramatsetse, B., & Adeodu, A. (2020). Design and simulation of a robotic arm for manufacturing operations in the railcar industry. *Procedia Manufacturing*, 51, 67-72.
6. Проектування мобільних маніпуляційних роботів : монографія / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, В. В. Євсєєв, С. П. Новоселов, Н. П. Демська ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2022. 427 с.
7. Розробка 3D-моделі зооморфного мобільного робота для вертикальних переміщень по металевим поверхням / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, Н. П. Демська, В. О. Руденко // Наука і техніка сьогодні. 2022. № 4(4). С.163-174.
8. Urrea, C., & Jara, D. (2021). Design, analysis, and comparison of control

strategies for an industrial robotic arm driven by a multi-level inverter. *Symmetry*, 13(1), 86.

9. Chowdhry, E. S. (2022). Structural design, analysis and optimisation of robotic arm. *Int Res J Eng Technol*, 9, 362-367.

10. Chotikunnan, R., Roongprasert, K., Chotikunnan, P., Imura, P., Sangworasil, M., & Srisiriwat, A. (2023). Robotic Arm Design and Control Using MATLAB/Simulink. *International Journal of Membrane Science and Technology*, 10(3), 2448-2459.

11. Santosh, L. P. S., Mishra, N., Mahanta, S. S. A., Dharmarajan, V., Varma, S. K., & Shoor, S. (2022). Design and analysis of a robotic arm under different loading conditions using FEA simulation. *Materials Today: Proceedings*, 50, 759-765.

12. Матрично-структурний аналіз напружено-деформованого стану гнучких міжз'єднань і компонентів МЕМС / І. Ш. Невлюдов, Н. П. Демська, В. А. Палагін, І. В. Боцман // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2020. – № 1(11). – С. 122–133.

13. Maksymova, S., Yevsieiev, V., & Demska, N. (2023). 3D Robot Model Development. *Technical Science Research In Uzbekistan*, 1(4), 255-267.

14. Nevliudov, I., Demska, N., Palagin, et all (2020, April). Stiffness Matrix of MEMS on the Stress-Strain Method Basis. In *2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)* (pp. 142-145). IEEE.

15. Демська Н. П. Технологія електричних міжз'єднань модулів електронної техніки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.27.06 "Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки" / Н. П. Демська ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків, 2020. 22 с.

## Додаток А

Код MATLAB для розрахунку кількості циклів

```
Sut=446e+6; %Межа розтягуючого напруження Sm = 0,95 * сут; %
Міцність матеріалу при 10 ^ 3 циклах Se1 = 0,5 * Сут; %Межа
витривалості
```

```
h=153; %Висота поперечного перерізу-метри br=80; %Ширина
поперечного перерізу-метри de=0,808*((h*br)^0,5); %Ефективний
діаметр A=4,51;
```

```
Bb=-0,265;
```

```
Ka=A.*(Sut.^Бb); %Поверхневий фактор Kb=1,51*(de^(-
0,157))*0,001; %Розмірний коефіцієнт Kc=1; %Коефіцієнт
завантаження
```

```
Kd=1; %температурний коефіцієнт Ke=1; %коефіцієнт надійності
```

```
Kf=1; %Різний фактор Se=Ka*Kb*Kc*Kd*Ke*Kf*Se1; N1=10e+3;
```

```
N2=5*(10e+8);
```

```
Z=log(N1)-log(N2); b=(1/Z)*log(Sm/Se); a=10^(log(Sm)-
(3*b));
```

```
Smin=4,49e+6; %Мінімальне напруження в циклі на деталі
```

```
Smax=15,92e+6; %Максимальне напруження в циклі на деталі
```

```
Srange=Smax-Smin; %Діапазон стресу
```

```
Salter=Srange/2; %Середнє значення змінного напруження
```

```
=(Smax+Smin)/2; %Середнє напруження Syeild=296e+6; %Yeild
```

```
Stress P=Smean/Sut;
```

```
Q=(1-Π);
```

```
Seffective=Salter/(Q); %Ефективна змінна напруга при фаліюрі
```

```

N=(Seffective/a)^(1/b); %Кількість циклів відмови
%Код Matlab для кривої S-N Sut=(50:50:650)*10^6; %Межа
розтягуючого напруження Sm = 0,95 * сут; % Міцність матеріалу
при 10 ^ 3 циклах Se1 = 0,5 * Сут; %Межа витривалості
h=153; %Висота поперечного перерізу-метри br=80; %Ширина
поперечного перерізу-метри de=0,808*((h*br)^0,5); %Ефективний
діаметр A=4,51
Bb=-0,265;
Ka=A.*(Sut.^Bb); %Поверхневий фактор Kb=1,51*(de.^(-
0,157))*0,001; %Розмірний коефіцієнт Kc=1; %Коефіцієнт
завантаження
Kd=1; %температурний коефіцієнт Ke=1; %коефіцієнт надійності
Kf=1; %Різний коефіцієнт F=Ka.*Kb; D=Kc*Kd*Ke*Kf*Se1;
Se=F.*D;

N1=10e+3;
N2=5*(10e+8);
Z=log(N1)-log(N2); b=(1/Z)*log(Sm./Se); a=10.^(log(Sm)-
(3.*b));

Smin=4521580; %Мінімальне напруження в циклі на деталі
Smax=20408400; %Максимальне напруження в циклі на деталі
Srange=Smax-Smin; %Діапазон стресу
Salter=Srange/2; %Середнє значення змінного напруження
=(Smax+Smin)/2; %Середнє напруження Syeild=296e+6; %Yeild
Stress P=Smean./Sut;
Q=(1-П);
Qq=1./Q;
Seffective=Salter*Qq; %Ефективний знаковмінний наголос при

```

```

фаліурі M= (Ефективний ./a) ;
Б=1 ./б;
N=M.^ (B) ;      %Кількість циклів для графіка відмови
(N, Seffective, 'b') ;
утримувати C =(0:1:9)*10e+16;
E=[7,9e+6 7,9e+6 7,9e+6 7,9e+6 7,9e+6 7,9e+6 7,9e+6
7,9e+6 7,9e+6 7,9e+6];
plot(C,E, 'r') ;

xlabel('Секунда часу'); ylabel('Напруга МПа');
title('Діаграма S-N');
legend('Крива S-N', 'Амплітуда напруження'); title('Крива S-
N для частини 2');
Сітка мінорна

```

**ДОДАТОК Б**  
**ДЕМОНСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ**

