

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

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Моделювання триланкового маніпулятора типової
модульної конструкції
(тема)

Виконав:
студент 4 курсу, групи АКТСІ-20-3

Лаврик В. Ю.

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія

Керівник доц. Демська Н.П

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2024р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
« 22 » квітня 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Лаврику Владиславу Юрійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка 3D-моделі трьохланкового маніпулятора типової модульної конструкції

Затверджена наказом по університету від 03.06.2024 р. № 545 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Основні конструктивні параметри: $L_{xy}=200\text{мм}$; $L_{xz}=130\text{мм}$; $L_N=50\text{мм}$; $m_{\text{деталі}}=600\text{гр}$; прискорення руху деталі $a=3\text{ м/с}^2$.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ, обґрунтування актуальності роботи;

4.2 Визначення мети, предмету та об'єкту розробки;

4.3 Аналіз літературних джерел;

4.4 Аналіз основних характеристик маніпуляторів;

4.5 Аналіз методів та принципів проектування засобів робототехніки;

4.6 Аналіз принципів побудови модульних конструкцій;

4.7 Вимоги до конструкції маніпулятора;

4.8 Вибір матеріалів для виготовлення;

4.9 Складання маніпулятора;

4.10 Моделювання та аналіз маніпулятора;

4.11 Розробка алгоритму керування маніпулятором;

4.12 Висновки

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

Графічний матеріал у вигляді презентації – 12 арк. ф. А 4

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	Актуальність роботи, постановка задачі	22.04.24 – 30.04.24	виконано
2	Визначення мети, предмету та об'єкту розробки	01.05.24 – 08.05.24	виконано
3	Аналіз літературних джерел. Аналіз існуючих конструкцій	09.05.24 – 14.05.24	виконано
4	Вимоги до конструкції	15.05.24 – 25.05.24	виконано
5	Вибір матеріалів	26.05.24 – 30.05.24	виконано
6	Розробка моделі	31.05.24 – 04.06.24	виконано
7	Подання роботи на перевірку автоматизованою системою щодо дотримання академічної доброчесності	05.06.24 – 09.06.24	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	10.06.24 – 13.06.24	виконано
	Подання роботи на рецензію	14.06.24 – 16.06.24	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	17.06.24 – 20.06.24	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	21.06.2024	виконано

Дата видачі завдання 22.04.2024 р.

Студент _____ Лаврик В. Ю.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Демська Н.П.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

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

18.06.2024

Владислав ЛАВРИК

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 56с., 3 табл., 47 рис., 1 дод., 15 джерел

МАНІПУЛЯТОР, ШАРНІРНИЙ МЕХАНІЗМ, СТУПЕНІ СВОБОДИ, ПРОЄКТУВАННЯ, ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ

Мета роботи – розробка трьохланкового маніпулятора з модульною конструкцією та магнітними шарнірами для забезпечення його ефективності та надійності у різних оперативних умовах.

Предмет розробки – модульний маніпулятор, призначений для виконання специфічних завдань у складних умовах.

Об'єкт розробки – модульний маніпулятор для виконання специфічних завдань у складних умовах.

У першому розділі було здійснено аналіз існуючих типів маніпуляторів та їх конструктивних особливостей виявило широкий спектр можливих застосувань та варіантів виконання.

У другому розділі були розглянуті ключові вимоги до конструкції маніпулятора, такі як ергономічність, надійність та легкість обслуговування. Вибір матеріалів для виготовлення був зосереджений на забезпеченні оптимальної міцності та довговічності. Для моделювання та керування було обрано програмне забезпечення Autodesk Inventor, оскільки воно є сумісним та ефективним у керуванні маніпулятором. Розробка алгоритму керування була спрямована на максимізацію точності та надійності роботи.

Розробка 3D-моделі трьохланкового маніпулятора з типовою модульною конструкцією дозволила практично оцінити потенційні переваги такого підходу. Проведене дослідження стійкості підтвердило високу надійність і ефективність такої конструкції у передбачених умовах експлуатації.

ABSTRACT

Explanatory note: 55 p., 3 tabl., 47 pic., 1 applications, 15 sources.

MANIPULATOR, HINGED MECHANISM, DEGREES OF FREEDOM, DESIGN, SOFTWARE

The purpose of the work is the development and analysis of a three-link manipulator with a modular design and magnetic hinges to ensure its efficiency and reliability in various operational conditions.

The subject of development is modeling of the structure and control of modular manipulators.

The object of development is a modular manipulator for performing specific tasks in difficult conditions.

In the first section, an analysis of existing types of manipulators and their design features revealed a wide range of possible applications and implementation options.

In the second section, the key requirements for the design of the manipulator, such as ergonomics, reliability and ease of maintenance, were considered. The choice of materials for construction was focused on ensuring optimal strength and durability. Autodesk Inventor software was chosen for modeling and control because it is compatible and efficient in controlling the manipulator. The development of the control algorithm was aimed at maximizing the accuracy and reliability of operation.

The development of a 3D model of a three-link manipulator with a typical modular design made it possible to practically assess the potential advantages of such an approach. The conducted stability study confirmed the high reliability and efficiency of such a design under the expected operating conditions.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	7
Вступ.....	8
1 Аналіз предметної області.....	10
1.1 Основні характеристики маніпуляторів	10
1.2 Класифікація маніпуляторів.....	10
1.2.1 Одноланкові маніпулятори	12
1.2.2 Дволанкові маніпулятори.....	13
1.2.3 Триланкові маніпулятори.....	13
1.2.4 Багатоланкові маніпулятори	13
1.3 Методи та принципи проектування засобів робототехніки	14
1.3.1 Уніфікація	14
1.3.2 Модульність.....	15
1.4 Принципи побудови модульних конструкцій	19
1.4.1 Переваги модульних конструкцій	20
1.4.2 Недоліки модульних конструкцій	21
1.4.3 Приклади використання в промисловості	21
2 Аналіз технічного завдання	22
2.1 Вимоги до конструкції маніпулятора	22
2.2 Вибір матеріалів для виготовлення	25
2.3 Складання маніпулятора	27
3 Розробка та тестування програмного забезпечення	37
3.1 Моделювання та аналіз маніпулятора	37
3.2 Розробка алгоритму керування маніпулятором.....	39
3.2.1 Постановка задачі	39
3.2.2 Мета дослідження	39
3.3 Тестування програмного забезпечення.....	41
3.4 Охорона праці.....	52

Висновки	54
Перелік джерел посилання	55
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	57

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БД – база даних;

ІМ – імітаційна модель;

ТЗ – технічне завдання;

DoF – ступені свободи.

ВСТУП

З моменту появи першого промислового маніпулятора в 60-х роках минулого століття промислові маніпулятори широко використовувалися в зварюванні, складанні, транспортуванні та інших сферах промислової автоматизації [1]. Однак із швидким зростанням промислового застосування вимоги до продуктивності промислового маніпулятора стають набагато різноманітнішими, що призводить до ситуації, коли звичайний процес проектування промислового маніпулятора важко адаптувати до цих швидких змін [2].

Навпаки, модульні маніпулятори можна швидко зібрати відповідно до вимог різних завдань для адаптації до різних сценаріїв застосування, що значно скорочує цикл проектування та повторюваність проектної роботи [3]. У порівнянні з традиційними маніпуляторами модульні маніпулятори мають наступні переваги: нижча собівартість виробництва; нижча вартість застосування; нижча вартість обслуговування [4].

Мета роботи – розробка трьохланкового маніпулятора з модульною конструкцією та магнітними шарнірами для забезпечення його ефективності та надійності у різних оперативних умовах.

Предмет розробки – модульний маніпулятор, призначений для виконання специфічних завдань у складних умовах.

Об'єкт розробки – модульний маніпулятор для виконання специфічних завдань у складних умовах.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі задачі:

- провести аналіз принципів побудови модульних конструкцій;
- визначити вимоги до конструкції маніпулятора;
- провести вибір матеріалів для виготовлення;
- провести складання маніпулятора;
- провести моделювання та аналіз маніпулятора;

– розробити алгоритм керування маніпулятором.

Пояснювальна записка виконано згідно з [5-6].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Основні характеристики маніпуляторів

Ступені свободи (DoF) – кількість ступенів свободи вказує на кількість незалежних рухів, які маніпулятор може виконувати [7]. Це включає обертання і пересування в просторі, що дозволяє маніпулятору виконувати складні завдання з високою точністю.

Маніпулятори розробляються таким чином, щоб бути гнучкими і адаптивними до різних умов робочого середовища і задач, що дозволяє їм виконувати широкий спектр операцій без необхідності перенастроювання або переоснащення.

Висока точність і здатність до повторюваності рухів є критично важливими для промислових застосувань, де потрібно виконувати складні завдання з високою точністю. Маніпулятори розробляються з різною вантажопідйомністю, від легких компонентів до важких вантажів, забезпечуючи широкий діапазон промислового застосування.

1.2 Класифікація маніпуляторів

Працездатність маніпуляторів оцінюється за такими технічними показниками [4]:

- робочий об'єм;
- маневреність;
- кут і коефіцієнт сервісу;
- число ступенів свободи;
- вантажопідйомність;
- швидкість руху;
- енергетичні показники.

Класифікація маніпуляторів у робототехніці може відбуватися за різними критеріями, залежно від їхньої конструкції, функціональності, області застосування та технічних характеристик. Основні критерії класифікації включають кількість ланок, тип шарнірів, конфігурацію, спосіб керування та область застосування.

Класифікація за кількістю ступенів свободи [4]:

– прості маніпулятори: мають обмежену кількість ступенів свободи (зазвичай 1-3), що обмежує їх здатність до маніпуляції об'єктами, але спрощує конструкцію та керування.

– складні маніпулятори: мають більшу кількість ступенів свободи (4 і більше), що дозволяє виконувати складні маніпуляції в просторі з високою точністю.

Класифікація за типом шарнірів [7]:

– револьверні (оберткові) шарніри: дозволяють обертання навколо осі. Маніпулятори з такими шарнірами здатні здійснювати кругові рухи;

– лінійні (прямі) шарніри: забезпечують переміщення вздовж лінії. Маніпулятори, що використовують ці шарніри, здійснюють лінійні переміщення.

Класифікація за конфігурацією [4]:

– картезіанські (прямокутні) маніпулятори: мають три перпендикулярні осі, що дозволяє їм переміщуватися в тривимірному просторі по прямокутній сітці;

– циліндричні маніпулятори: комбінують лінійні та оберткові рухи, що надає їм змогу переміщуватися в просторі, що обмежений циліндричною областю;

– сферичні маніпулятори: мають точку обертання, від якої вони можуть переміщуватися у сферичній області;

– складені (артикульовані) маніпулятори: імітують будову людської руки з декількома ступенями свободи, що дозволяє виконувати складні маніпуляції;

– паралельні маніпулятори: мають кілька незалежних ланок, приєднаних до однієї бази; здатні забезпечити високу точність і швидкість.

Класифікація за способом керування [4]:

– ручні маніпулятори: керуються оператором безпосередньо через фізичні механізми або за допомогою пультів дистанційного керування;

– програмовані маніпулятори: виконують завдання на основі заздалегідь заданої програми;

– адаптивні або інтелектуальні маніпулятори: використовують алгоритми штучного інтелекту для адаптації до змін у робочому середовищі або завданні в реальному часі.

Одноланкові, дволанкові, триланкові, та багатоланкові маніпулятори представляють різні конфігурації роботизованих систем, кожна з яких має свої унікальні можливості, переваги та недоліки. Їх класифікація за кількістю ланок відображає не лише складність конструкції, але й здатність виконувати різноманітні завдання в промисловості та дослідницьких областях.

1.2.1 Одноланкові маніпулятори

Одноланковий маніпулятор складається з однієї ланки, що може обертатися або переміщуватися лінійно відносно однієї точки кріплення [4]. Це найпростіша форма маніпулятора з обмеженими можливостями маніпуляції.

Переваги:

– простота конструкції та керування;
– низька вартість виробництва та обслуговування;
– висока надійність та довговічність через мінімальну кількість рухомих частин.

Недоліки:

– обмежена функціональність та гнучкість;
– низька точність та обмежені можливості позиціонування.

1.2.2 Дволанкові маніпулятори

Дволанкові маніпулятори мають дві ланки, з'єднані шарніром, що дозволяє виконувати більш складні рухи та досягати більшої гнучкості [4].

Переваги:

- здатність виконувати складніші рухи порівняно з одноланковими маніпуляторами;
- підвищена точність та гнучкість у позиціонуванні;
- краще використання в обмежених просторах.

Недоліки:

- складніше керування та програмування;
- вища вартість виробництва та обслуговування порівняно з одноланковими маніпуляторами.

1.2.3 Триланкові маніпулятори

Триланкові маніпулятори складаються з трьох ланок, з'єднаних шарнірами, що значно розширює їх здатність до маніпуляції та досягнення складних позицій [4].

Переваги:

- висока гнучкість та здатність до точного позиціонування;
- здатність виконувати більш складні завдання з високою точністю;
- підходять для застосування в різних промислових та дослідницьких сферах.

Недоліки:

- висока складність керування та програмування;
- підвищені вимоги до обслуговування та вартості.

1.2.4 Багатоланкові маніпулятори

Багатоланкові маніпулятори мають чотири або більше ланок, що забезпечують виняткову гнучкість та здатність до виконання дуже складних маніпуляцій [4].

Переваги:

- екстремальна гнучкість та допуск до складних маніпуляцій;
- висока точність та здатність до виконання дуже складних завдань;
- широкий спектр застосувань, включаючи складну автоматизацію, медицину, дослідницькі лабораторії.

Недоліки:

- висока складність керування та програмування;
- високі вимоги до технічного обслуговування;
- значно вища вартість виробництва та експлуатації.

При порівнянні різних типів маніпуляторів, ключовими факторами є вартість, складність керування, гнучкість у виконанні завдань, та області застосування [6]. Збільшення кількості ланок веде до підвищення гнучкості та точності маніпулятора, але також збільшує складність керування, вартість виробництва та обслуговування. Тому вибір конкретного типу маніпулятора залежить від специфічних вимог задачі, що перед ним стоїть.

1.3 Методи та принципи проектування засобів робототехніки

1.3.1 Уніфікація

У основі усіх методів проектування техніки лежить уніфікація. Проектування нового виробу – це завжди суперечливе завдання для розробника: з одного боку існує природне прагнення використати усі останні досягнення науки і техніки в цій області, з іншої – цьому перешкоджають обмеження по термінах, вартості, матеріальним ресурсам та ін., обумовлені зазвичай в технічних вимогах до створюваного виробу [7].

Уніфікація – це найбільш ефективний метод стандартизації, що полягає в раціональному скороченні числа об'єктів однакового функціонального призначення з метою підвищити продуктивність праці і економічність виробництва і експлуатації, поліпшити якість і забезпечити взаємозамінюваність.

У робототехніці уніфікація розвивається по трьох рівнях: для компонентів роботів, для власне роботів і для роботизованих технологічних комплексів.

Добре відпрацьовані і серійно виготовлені уніфіковані компоненти – по суті єдино можлива основа розвитку робототехніки в умовах згаданого вище швидкого зростання номенклатури роботів з урахуванням необхідності при цьому оперативного створення, освоєння виробництва і експлуатації нових типів роботів і їх модифікацій [8].

1.3.2 Модульність

Створення уніфікованих функціональних компонентів роботів стало першим етапом уніфікації в області робототехніки. Її наступним етапом стала уніфікація конструкції цих компонентів і програмного забезпечення на основі модульного принципу побудови [8].

Суть цього принципу полягає в побудові механічних, апаратних і програмних частин робота з дрібніших уніфікованих частин – модулів, які дозволяють здійснювати різні комбонування з деякого їх набору. Система таких модулів будується за ієрархічним принципом, коли складніші модулі складаються з дрібніших модулів. Наприклад, привід виконаний у вигляді модуля, є готовою конструктивною частиною для складання маніпуляторів і облаштувань пересування, пристосованого для з'єднання з модулями іншого функціонального призначення [8].

При цьому у свою чергу він складається з ряду модулів, які дозволяють збирати різні модифікації цього типу приводу.

Модульний принцип побудови роботів дозволяє найлегше створювати їх модифікації і абсолютно нові типи на базі одних і тих же конструктивних частин.

При цьому виникає можливість у кожному конкретному випадку найбільш оптимально вибирати міру кінематичної, апаратної і програмної надмірності, вартість і розподіл функції між роботом і працюючим разом з ним

технологічним устаткуванням (аж до конструктивного об'єднання окремих модулів робота з цим устаткуванням) [8].

Взаємодія модулів дуже важлива при що характеризує модульність. існує три різних типів модульність, пов'язана з сімействами продуктів: функціональними, технічними та фізичними модульність.

Функціональна модульність фокусується на взаємодії функціональних вимог до різних груп клієнтів, тобто кожна група клієнтів охарактеризована за певним набором функціональних вимог.

Технічна модульність визначається технологічна можливість конструктивного рішення. В основному взаємодія визначається конструктивними параметрами як здатність задовольняти функціональні вимоги [8].

Фізична модульність базується на фізичних взаємодіях, з конструкційної точки зору.

Для прикладу розглянемо функціональні модулі орто-гексаедра (рис. 1.1), розроблені в єдиному розмірі. Завдяки регулярній геометричності модуля робота його форма та просторово-заповнювальний характер можуть бути об'єднані в стабільну загальну конфігурацію [9].

Різні функціональні модулі інтегровані в різні функціональні конфігурації роботів використовуючи комбінацію активних і пасивних з'єднань, як показано на рис. 1.1. Функціональні модулі можна розділити на проміжні функціональні модулі, модулі гойдання, функціональні модулі обертання, функціональні модулі затискання тощо. Крім того, деякі допоміжні модулі реалізують конкретні завдання, такі як сенсорні модулі, модулі з функцією компенсації, модулі моніторингу та ідентифікації тощо.

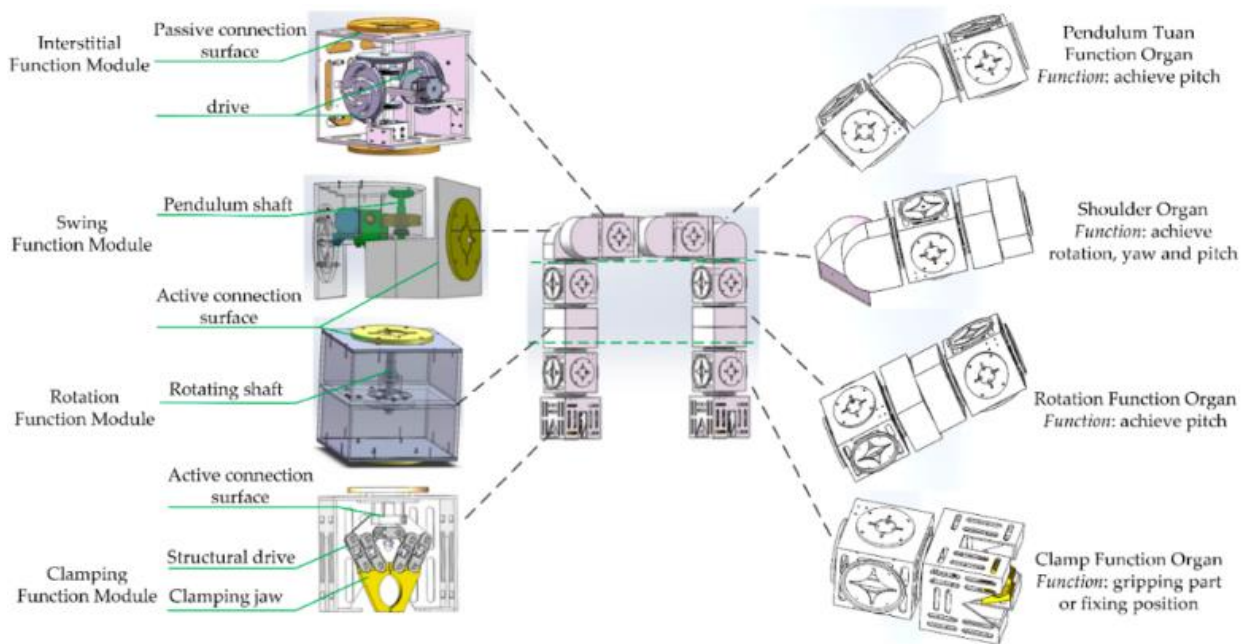


Рисунок 1.1 – Модульний склад робота-реконфігуратора [9]

Насправді програмне забезпечення та апаратне забезпечення (з точки зору доступності та максимального корисного навантаження) є бар'єром гнучкості сучасних промислових роботів. З іншого боку, дослідники та промисловість наразі докладають зусиль для розробки модульних роботів (з точки зору апаратного та програмного забезпечення), які є обчислюваними та змінними для конкретних завдань.

У цьому контексті робота [10] спрямована на розробку нової методології проектування, яка поєднує як представлення знань для визначення завдань, так і обчислювальні інструменти для структурного та логічного проектування з використанням модульних одиниць.

Щоб продемонструвати його придатність у промисловому контексті, що потребує можливості реконфігурації, було розроблено спеціальні розробки та перевірено на простому корпусі (рис. 1.2).

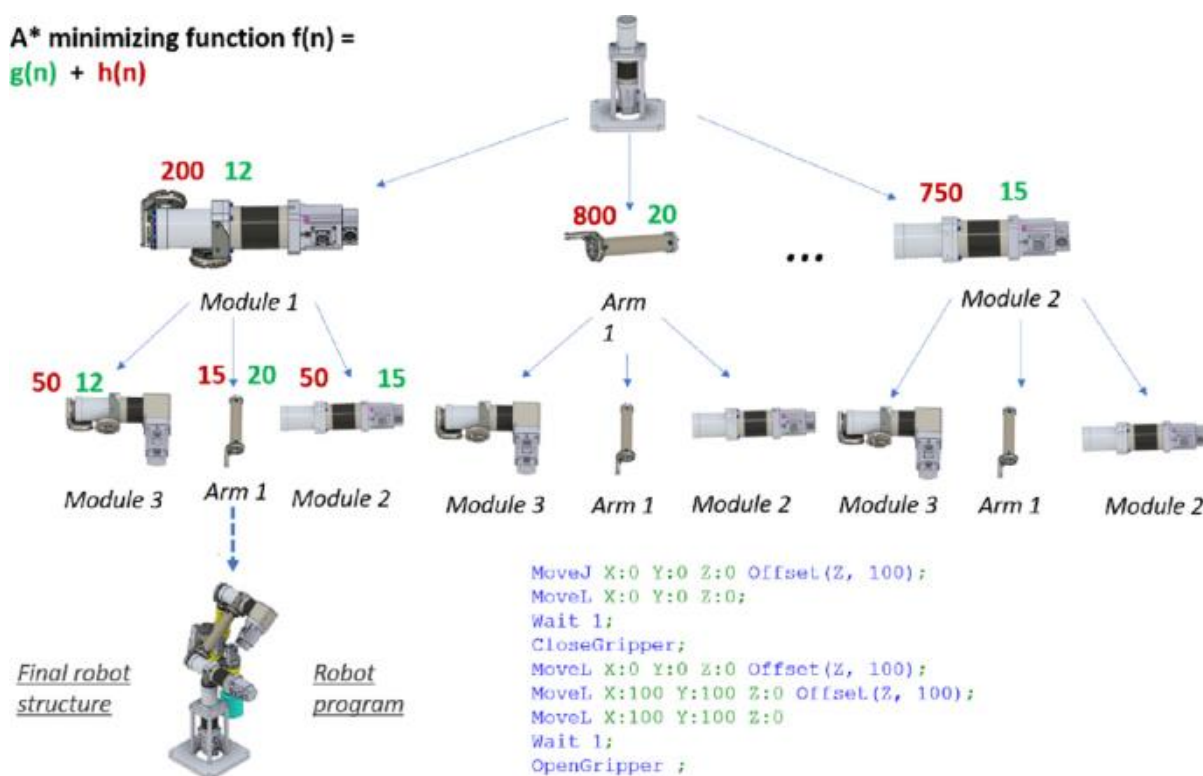


Рисунок 1.5 – Зважений графік із кращим шляхом визначення остаточної структури модульного робота та її відповідна програма [10]

В цілому модульний підхід до побудови роботів дає наступні переваги:

- різко скорочуються (до декількох місяців) терміни створення, освоєння виробництва і впровадження нових марок роботів, оскільки вони збираються з добре відпрацьованих серійних компонентів;

- зростає технічний рівень роботів, їх надійність і знижується вартість; останнє пов'язане не лише із здешевленням компонентів роботів при їх серійному виробництві, але і зі зменшенням надмірності в конструкції і параметрах роботів завдяки тому, що з'являється можливість для кожного конкретного варіанту застосування компонувати роботи з мінімально необхідного числа простих модулів;

- знижуються витрати на створення, виробництво, впровадження і експлуатацію роботів, істотно спрощується їх обслуговування; спрощується також завдання модернізації технологічних комплексів шляхом доукомплектування роботів, що входять в них, новими модулями і застосування окремих модулів в якості самостійних технологічних

пристосувань (механічні руки, кантувальники, міжопераційні транспортні пристрої і так далі);

– виробництво роботів зводиться головним чином до їх складання із стандартних частин, що може бути організовано практично на будь-якому машинобудівному виробництві.

Сьогодні модульний принцип побудови роботів успішно використовується усіма провідними фірмами, що виробляють роботи, у тому числі Юнімейшен і Праб (США), Міцубісі і Фанук (Японія), Фольксваген і Бош (Німеччина), Сіаки (Франція), Оливетті (Італія), АСЕА і Електролюкс (Швеція) [10].

1.4 Принципи побудови модульних конструкцій

Принципи побудови модульних конструкцій включають:

– стандартизація інтерфейсів. Одним із ключових принципів модульної робототехніки є стандартизація інтерфейсів для з'єднання модулів [9]. Це включає механічні з'єднання, електричні з'єднання та протоколи передачі даних. Стандартизація дозволяє модулям легко з'єднуватися та спілкуватися між собою, спрощуючи процес проектування та інтеграції різних компонентів:

– взаємозамінність. Модульні конструкції базуються на використанні взаємозамінних модулів, що можуть бути легко замінені або модифіковані без потреби в зміні інших компонентів системи [9]. Це забезпечує гнучкість у проектуванні та експлуатації роботизованих систем, дозволяючи швидко адаптуватися до нових завдань або умов роботи:

– масштабованість. Модульність дозволяє легко масштабувати системи, додаючи або видаляючи модулі для зміни їх функціональності або продуктивності. Це може включати збільшення розміру робота, додавання нових сенсорів або актуаторів, або інтеграцію додаткових обчислювальних ресурсів [4]:

– модульність на різних рівнях. Модульність може бути застосована на

різних рівнях роботизованої системи, від окремих компонентів, таких як актуатори та сенсори, до великих функціональних блоків, таких як маніпулятори або системи мобільності [7];

– реконфігурованість. Модульні системи часто розробляються так, щоб їх можна було легко реконфігурувати для виконання різних завдань або для роботи в різних умовах. Це може включати зміну конфігурації актуаторів для зміни діапазону руху робота або інтеграцію нових сенсорів для розширення його сприйняття оточення [9].

Модульні конструкції в робототехніці пропонують значні переваги у термінах гнучкості, масштабованості та ефективності розробки. Вони дозволяють швидко створювати і адаптувати роботизовані системи для вирішення широкого спектра задач, від промислового виробництва до досліджень та рятувальних операцій, надаючи інженерам потужний інструмент для інновацій у галузі робототехніки [8].

Модульні конструкції в робототехніці мають ряд визначних переваг та недоліків порівняно з традиційними, не модульними конструкціями. Ці характеристики впливають на вибір дизайну для конкретних застосувань в промисловості та інших сферах [8].

1.4.1 Переваги модульних конструкцій

Модульні системи легко адаптуються до різних завдань і умов експлуатації, оскільки модулі можна швидко замінювати або реконфігурувати для виконання нових функцій. Використання стандартизованих модулів спрощує процеси проектування та виробництва, знижуючи вартість і скорочуючи час розробки нових роботів [9].

Поломки або знос окремих модулів не вимагають повної заміни всієї системи. Модулі можна легко замінити або відремонтувати, що знижує простої та вартість обслуговування [9]. Модульні конструкції дозволяють легко масштабувати роботизовані системи, додаючи додаткові модулі для підвищення продуктивності або функціональності. Стандартизація та масове

виробництво модулів можуть знизити вартість компонентів, зробивши робототехніку більш доступною.

1.4.2 Недоліки модульних конструкцій

Стандартизація може обмежувати індивідуальні проектні рішення, зменшуючи оптимізацію під специфічні задачі. Інтеграція та спілкування між модулями може вимагати додаткових ресурсів, що потенційно знижує загальну продуктивність системи [7]. Модульні системи часто є менш спеціалізованими порівняно з системами, розробленими під конкретні завдання, що може впливати на їх ефективність у деяких застосуваннях.

1.4.3 Приклади використання в промисловості

У промисловому виробництві модульні маніпулятори можуть бути швидко адаптовані під різні завдання, такі як збірка, пакування, зварювання або обробка матеріалів, змінюючи кінцеві ефектори або додавання додаткових осей [7].

Мобільні роботи, оснащені модульними сенсорними системами, можуть бути адаптовані для різноманітних завдань моніторингу, доставки, або інспекції у великих промислових об'єктах.

Ефективність модульних конструкцій у промислових застосуваннях часто залежить від здатності швидко переналаштовувати та адаптувати роботизовані системи під змінні умови виробництва, забезпечуючи високу гнучкість та економію витрат на обслуговування та модернізацію обладнання [7].

2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

2.1 Вимоги до конструкції маніпулятора

Конструкція трьохланкового маніпулятора повинна відповідати наступним вимогам:

– конструкція повинна бути достатньо міцною та стійкою, щоб забезпечити надійну роботу маніпулятора навіть під час виконання різних завдань [11-12]. Маніпулятор повинен мати достатню гнучкість для виконання різноманітних завдань та можливість маневрувати в обмеженому просторі. Конструкція повинна бути оптимізована для досягнення максимальної ефективності виконання завдань з врахуванням обмежень, таких як швидкість, точність і сила;

– конструкція повинна бути легкою та компактною, щоб забезпечити зручність в управлінні та можливість використання в різних умовах. Маніпулятор повинен мати вбудовані заходи безпеки, щоб уникнути травмування операторів та недопущення випадкових пошкоджень;

– конструкція повинна відповідати відповідним стандартам і нормативам, які регулюють роботу та безпеку робототехнічних систем. Маніпулятор повинен бути легко налаштовувати, управляти та обслуговувати, щоб забезпечити максимальну ефективність роботи.

Врахування цих вимог допоможе розробити оптимальну конструкцію трьохланкового маніпулятора з магнітними шарнірами, яка буде відповідати потребам конкретного застосування.

Основні конструктивні параметри: $L_{xy}=200\text{мм}$; $L_{xv}=130\text{ мм}$; $L_N=50\text{мм}$; $m_{\text{деталі}}=600\text{ гр}$; прискорення руху деталі $a=3\text{ м/с}^2$.

Робот-маніпулятор, що розробляється, потрібно представити як механізм, складений з трьох ланок (рис. 2.1). Щоб спростити обчислення, ми припускаємо, що центр ваги кожної ланки знаходиться у її центрі.

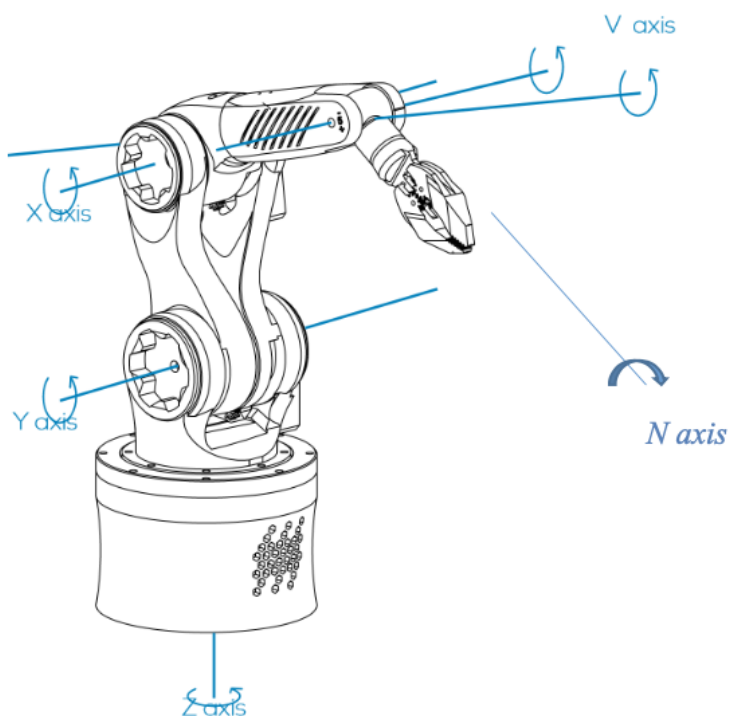


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд маніпулятора

Якщо розглядати схему механізму у той момент, коли крутні моменти у шарнірах досягають пікових значень, тобто сила тяжіння має найбільший момент під дією, отримаємо розрахункову схему представлену на рис. 2.2.

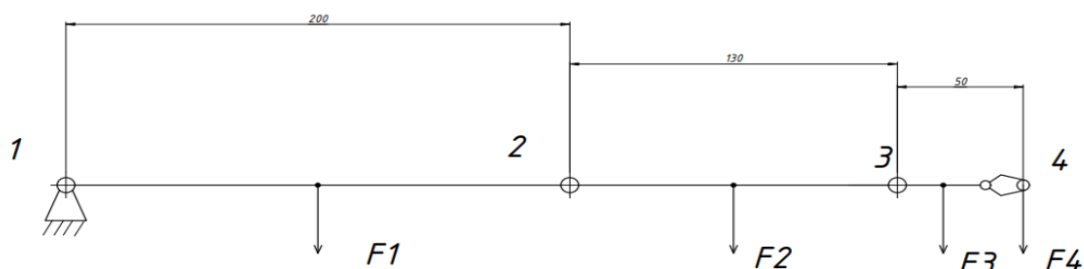


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема

Однією з головних проблем в управлінні роботизованими системами є те, що вони дуже обмежені [11]. Зокрема, положення суглоба, швидкості та межі прискорення. Спочатку введемо позначення, які будуть використовуватися:

- $t \in R^+$ – позначає час;
- $i \in N$ – позначає дискретні часові кроки;
- δt – тривалість кроку за часом регулятора з дискретним часом;
- $q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t) \in R$ – положення суглоба, швидкість і прискорення в момент часу t ;

$$- q_i \triangleq q(i\delta t), \dot{q}_i \triangleq \dot{q}(i\delta t), \ddot{q}_i \triangleq \ddot{q}(i\delta t);$$

$$- q^{\min}, q^{\max} \text{ – межі положення суглоба;}$$

$$- \dot{q}^{\max}, \ddot{q}^{\max} \text{ – максимальна спільна швидкість і прискорення.}$$

Тепер ми можемо визначити вищезгадані межі як:

$$q^{\min} \leq q \leq q^{\max}, \quad |\dot{q}| \leq \dot{q}^{\max}, \quad |\ddot{q}| \leq \ddot{q}^{\max}$$

Припускаючи, що на кожному кроці часу i ми застосовуємо постійне прискорення суглоба, ми можемо виразити майбутнє положення суглоба q_{i+1} і швидкість \dot{q}_{i+1} як функції поточного прискорення суглоба \ddot{q}_i :

$$\begin{aligned} q_{i+1} &= q_i + \delta t \dot{q}_i + \frac{1}{2} \delta t^2 \ddot{q}_i \\ \dot{q}_{i+1} &= \dot{q}_i + \delta t \ddot{q}_i \end{aligned}$$

Наївний підхід до обмеження прискорення полягає в тому, щоб обчислити максимальне та мінімальне \ddot{q}_i такі, що q_{i+1} та \dot{q}_{i+1} знаходяться в їхніх межах:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i &\leq \min \left(\ddot{q}^{\max}, \frac{1}{\delta t} (\dot{q}^{\max} - \dot{q}_i), \frac{2}{\delta t^2} (q^{\max} - q_i - \delta t \dot{q}_i) \right) \\ \ddot{q}_i &\geq \max \left(-\ddot{q}^{\max}, \frac{1}{\delta t} (-\dot{q}^{\max} - \dot{q}_i), \frac{2}{\delta t^2} (q^{\min} - q_i - \delta t \dot{q}_i) \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Цей підхід не працює на практиці [13], оскільки отримані межі прискорення можуть бути несумісними (тобто верхня межа менша за нижню).

З тих пір було запропоновано декілька вдосконалень цього основного підходу, але, здається, жодне з них не вирішило повністю проблему. Ще один метод полягає у використанні більшого значення δt у (2.1), що призводить до більш жорстких обмежень.

Загалом це допомагає зменшити прискорення під час наближення до обмеження положення/швидкості, але це не гарантує сумісності результуючих обмежень [13].

Тіло масою $m_t=0.6$, яке знаходиться у точці 4, рухається з прискоренням, що направлене протилежно до прискорення вільного падіння та має значення 3 м/с^2 . Відповідно, сила, що діє на це тіло, $F_4 = m_t \cdot (g + a_t)$.

Прискорення також впливає на ланки 1, 2 і 3, і нам потрібно визначити їх. Кутове прискорення (ε) у точках, де діють сили F_1 , F_2 , F_3 і F_4 , можна обчислити за допомогою загальної формули для кутового прискорення: $\varepsilon = a_t \cdot r$ де a_t – тангенціальне прискорення, r – радіус. Можна припустити, що дане нам прискорення руху деталі є дотичним прискоренням a_t , яке діє у точці 4.

Серед двигунів серії Nema 23. Цей двигун використовується для приводу в рух важелів АВ і ВС, а також встановлюється на поворотну платформу.

Для руху ланки CD використовується кроковий двигун FL42STH25-0404В з крутним моментом $0,17 \text{ Н*м}$. Це значно менше необхідного, але двигун приводить важіль через зубчасту передачу, що дозволяє налаштувати потрібне передатне відношення між двигуном на поворотній платформі та першим важелем.

2.2 Вибір матеріалів для виготовлення

Перейдемо до вибору матеріалів для виготовлення компонентів маніпулятора. Для початку опишемо усі частини та матеріали, які потрібні для розробки маніпулятора. В табл. 2.1 відображено список 3D-друкованих частин. В табл. 2.2 представлено список компонентів.

Таблиця 2.1 – 3D-друковані частини

Частини	Кількість
Arm 1 gear.STL	1
Arm 1 lower.STL	1
Arm 1 upper.STL	1
Arm 2.STL	1
Arm 3.STL	1
Base gear.STL	1
Base.STL	1
Grasper 1.STL	1
Grasper 2.STL	1
Grasper Body.STL	1
Grasper holder.STL	1
Ring.STL	1
Side cover arm L.STL	1
Side cover arm R.STL	1
Side cover base L.STL	1
Side cover base R.STL	1
Side lid arm L.STL	1
Side lid arm R.STL	1
Small gear.stl	1
Support.STL	1

Таблиця 2.2 – Компоненти

Компонент	Кількість
Steel rod $\varnothing 8 \times 80$	2
M3 x 12 SHCS screw	14
M3 x 20 SHCS screw	10
M3 nut	8
Steel balls	36
Spring 6x20	2
Bearing 608	1

В табл. 2.3 представлено список електронних компонентів.

Таблиця 2.3 – Електроніка

Компонент	Кількість
Power supply	1
RAMPS 1.4 board	1
Nema 17 Stepper Motors	3
40x40 Fan	2

2.3 Складання маніпулятора

На першому етапі з'єднуємо пружини та захват, для цього треба взяти дві пружини 6x20 і з'єднати їх з захватом 1 і захватом (рис. 2.3).

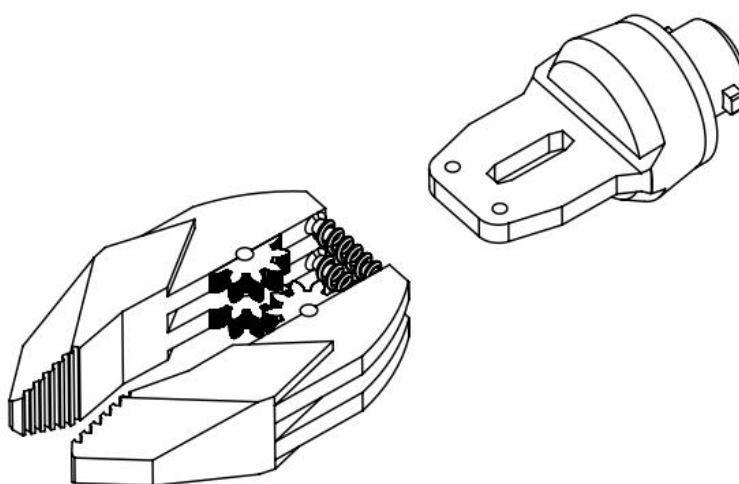


Рисунок 2.3 – З'єднання пружин та захвату

Далі необхідно встановити складений захват на корпус захоплення, як показано на рис. 2.4.

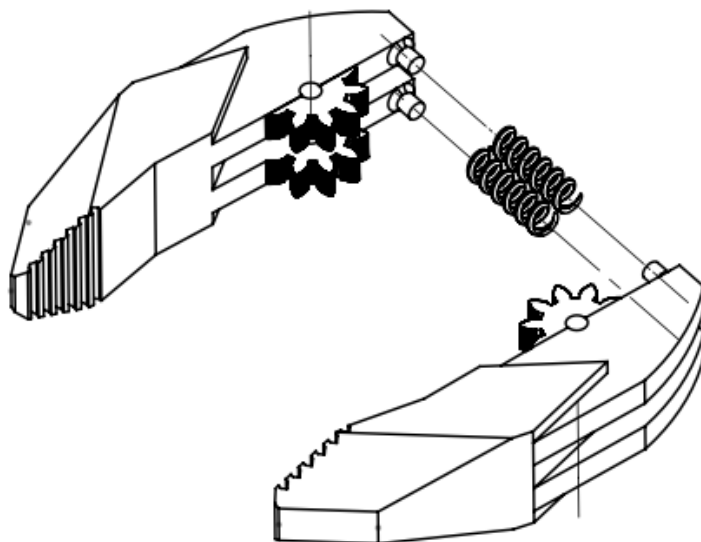


Рисунок 2.4 – Встановлення збірки

Вставляємо два гвинта М3 х 20 SHCS в захват 1 и захват 2 (рис. 2.5)

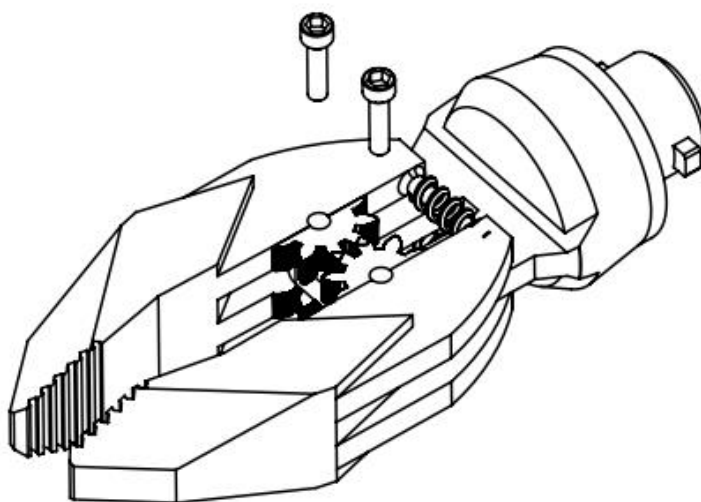


Рисунок 2.5 – Встановлення гвинтів

З'єднуємо тримач захвату з рукояткою (компонент Arm 3.STL), як показано на рис. 2.6.

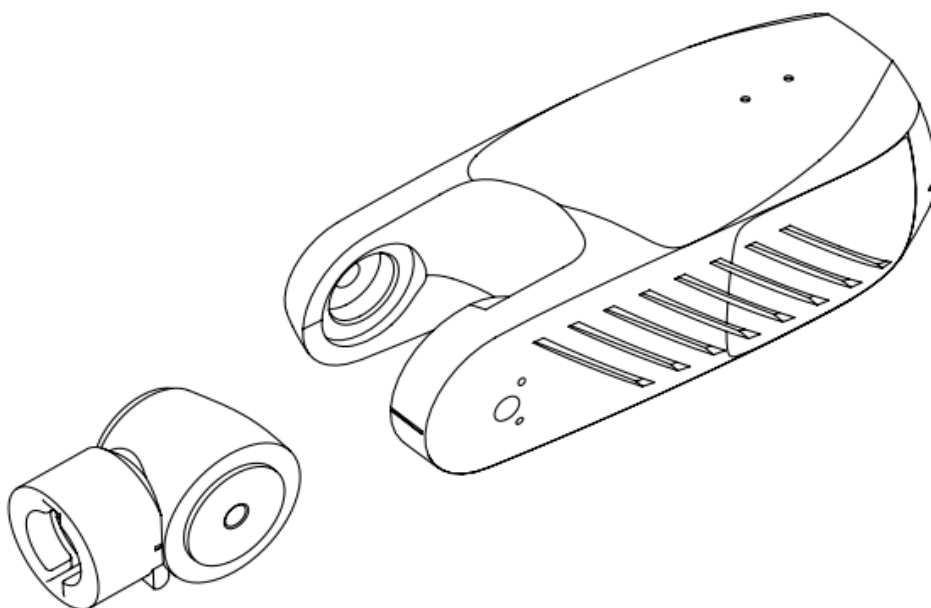


Рисунок 2.6 – З'єднання тримача захвату з рукояткою

Вставляємо захват у тримач захвату (рис. 2.7).

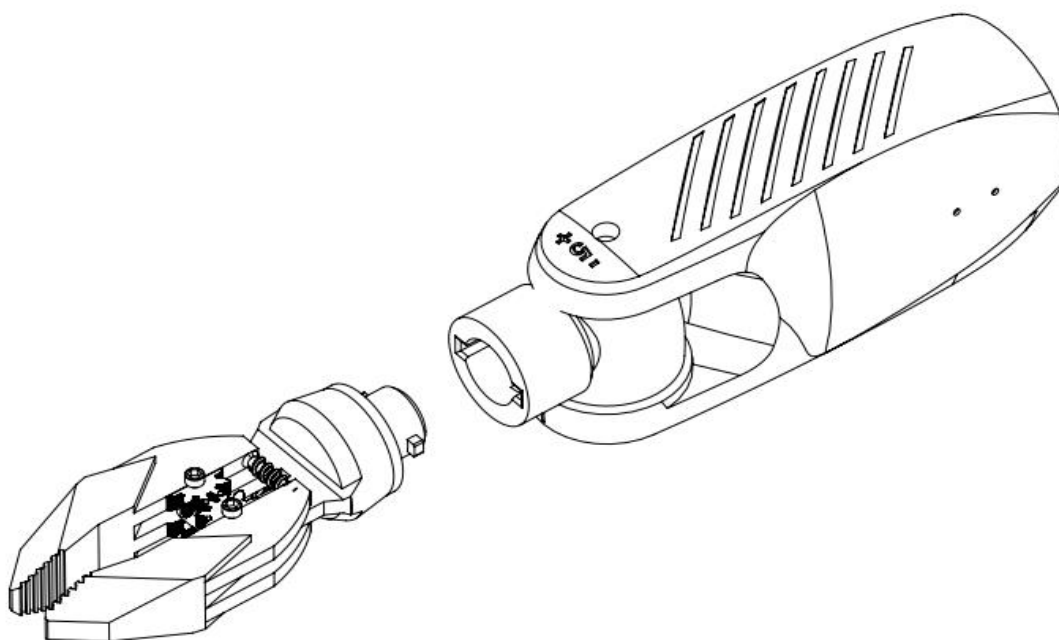


Рисунок 2.7 – Вставка захвату у тримач захвату

Вставляємо два шарніри у верхній кронштейн 1, як показано на рис. 2.8.

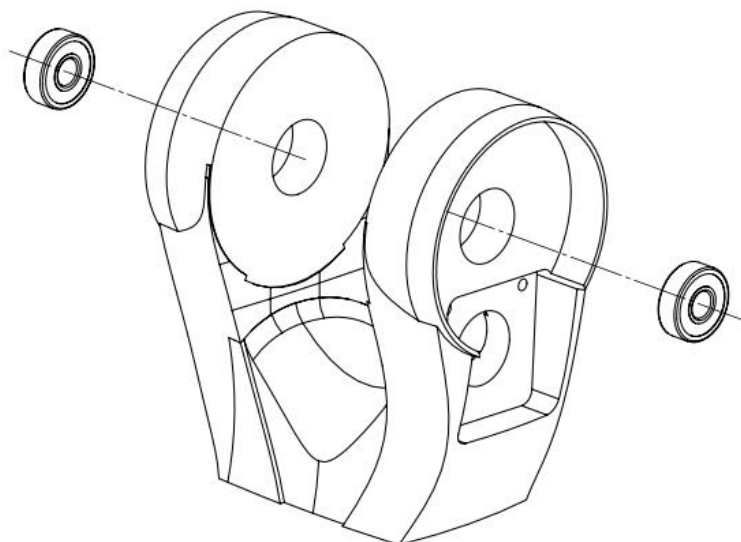


Рисунок 2.8 – Вставка шарнірів

Для наступної ланки потрібно виконати наступні кроки. З'єднуємо основу із зубчастим кільцем, потім з'єднати її вісьмома гвинтами SHCS і вісьмома гайками МЗ. Кільце слід розмістити між основою і зубчастим кільцем (рис. 2.9).

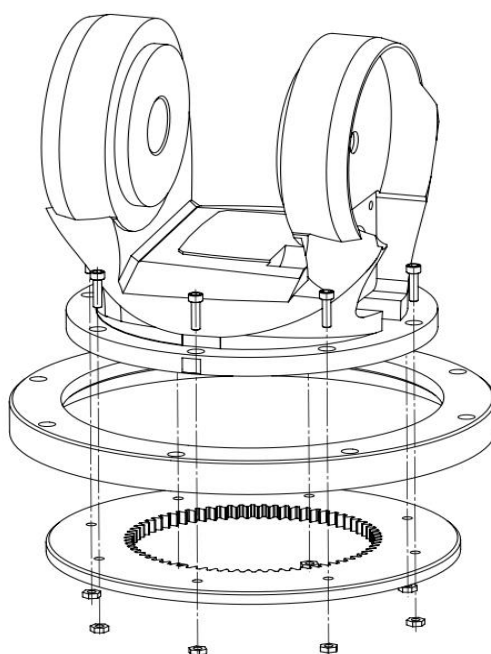


Рисунок 2.9 – З'єднання основи

Розміщуємо малу шестерню на вал двигуна (рис. 2.10).

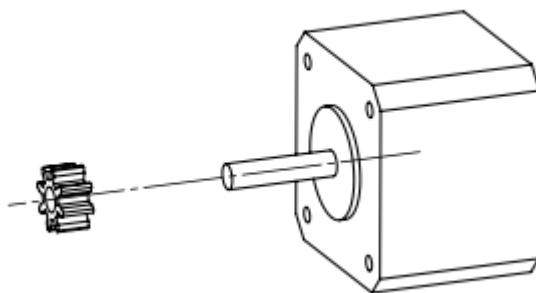


Рисунок 2.10 – Двигун

Вставляємо двигун у гніздо в основі (рис. 2.11).

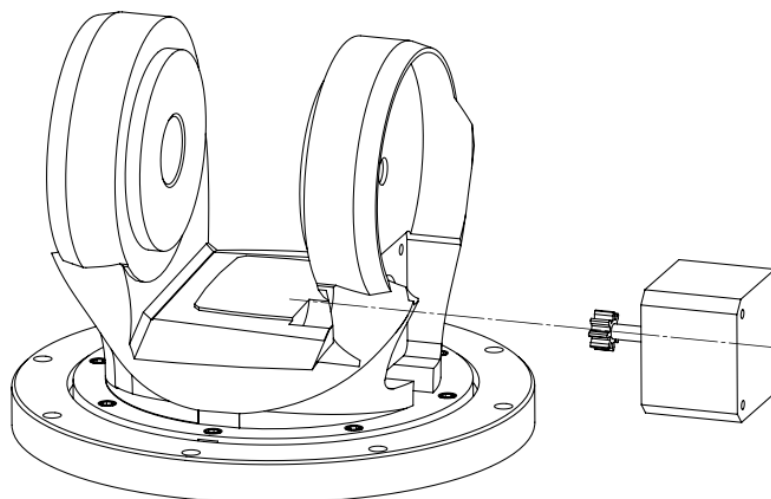


Рисунок 2.11 – Вставка двигуна

Для складання третьої ланки потрібно встановити редуктор вертикальної осі на двигун (рис. 2.12).

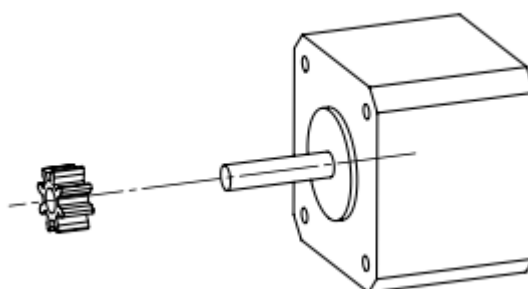


Рисунок 2.12 – Вставка редуктора

Далі встановлюємо двигун на гніздо опори (рис. 2.13).

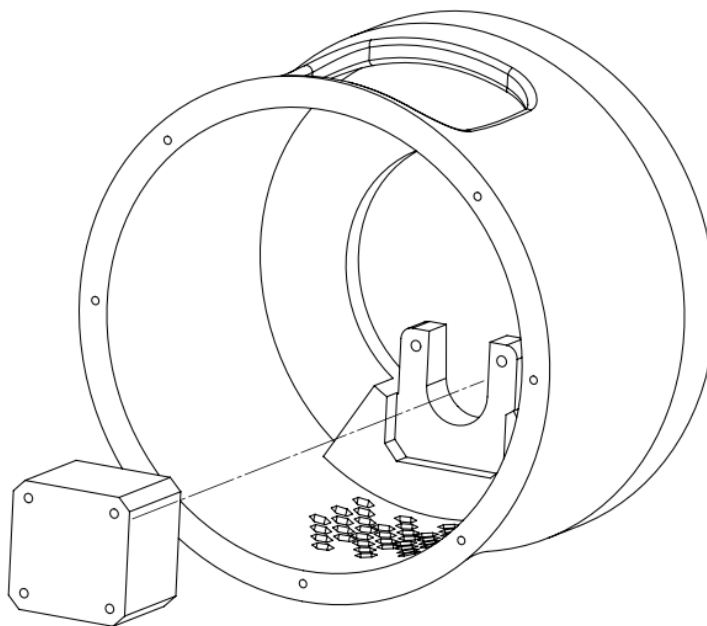


Рисунок 2.13 – Вставка двигуна на гніздо опори

Гвинтом М3 х 12 SHCS закріпити двигун (рис. 2.14).

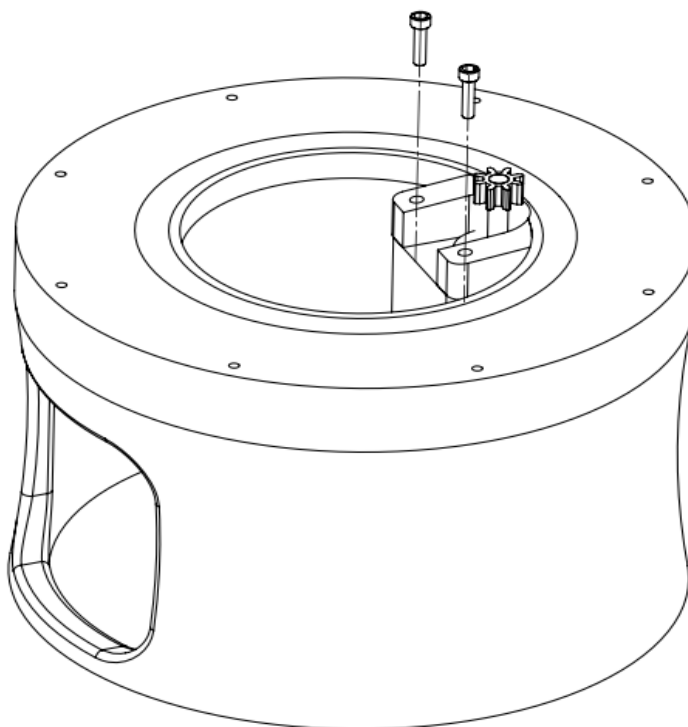


Рисунок 2.14 – Закріплення двигуна

З'єднати вузол осі Y із опорою за допомогою 8 гвинтів М3 х 20 SHCS (рис. 2.15).

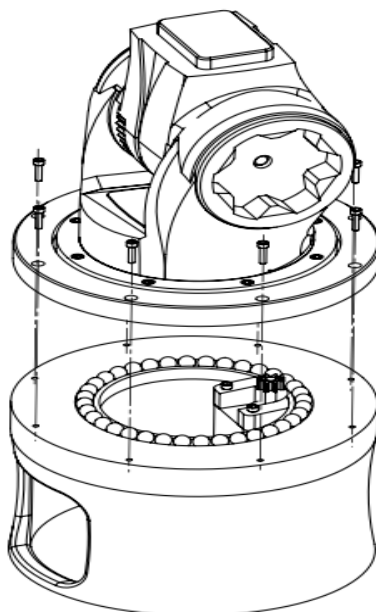


Рисунок 2.15 – Закріплення вузла

З'єднати вісь X із вузлом осі Y (рис. 2.16).

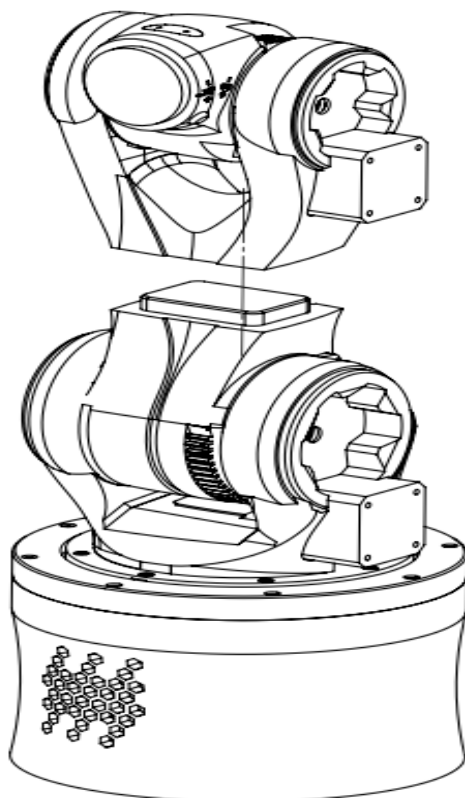


Рисунок 2.16 – З'єднання вісі X із вузлом осі Y.

З'єднати вузол осі V із вузлом осі X (рис. 2.17).

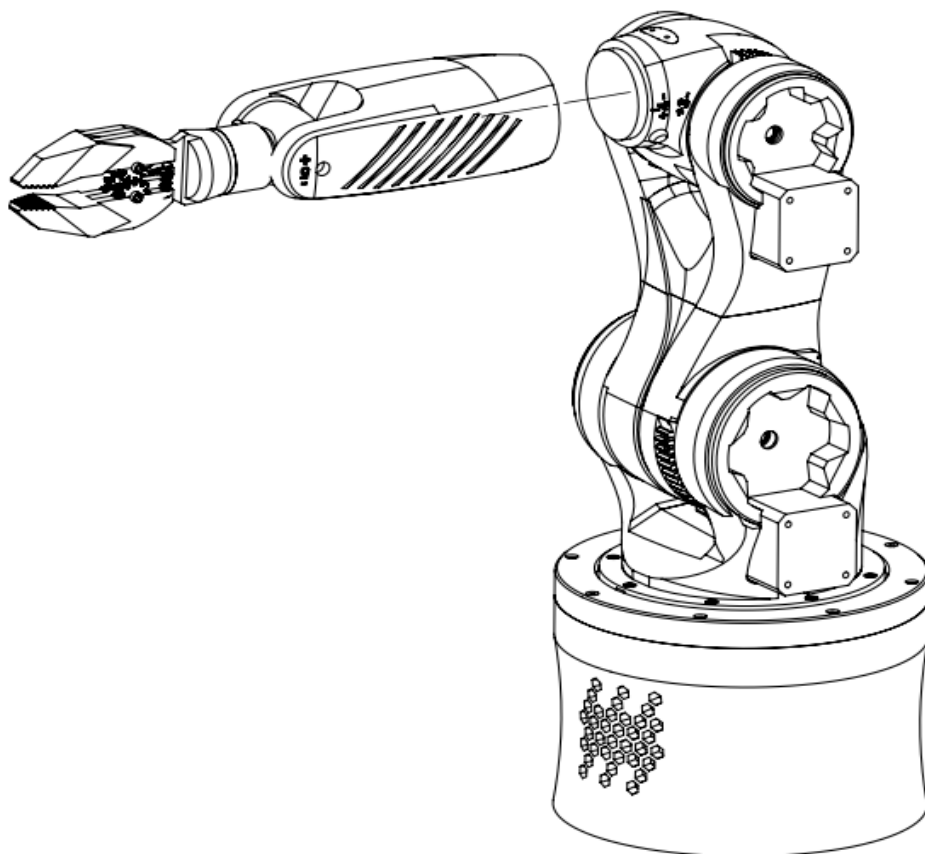


Рисунок 2.17 – Фінальний вигляд

Перейдемо до вибору програмного забезпечення для моделювання та керування та розробки експериментального дослідження навантаження на маніпулятор.

Для корпусу маніпулятора ми використаємо АБС пластик з бібліотеки матеріалів Autodesk (рис. 2.18, а).

Для підшипників обираємо леговану сталь з бібліотеки матеріалів Autodesk (рис. 2.18, б).

Редактор материалов: Пластик ABS

Identity Представление **Физические свойства**

▼ Информация

Имя: Акрилонитрилбутадиенст...

Описание: Акрилонитрилбутадиенст...

Ключевые слова: ABS, конструкционный, Пл...

Тип: Пластик

Подкласс: Термопластик

Источник: Autodesk

URL-адрес:

▼ Базовые температурные

Теплопроводность: 1,600E-01 Вт/(м·К)

Удельная теплоемкость: 1,500 Дж/(г·°C)

Коэффициент теплового расширения: 85,700 мкм/(м·°C)

▼ Спецификация

Поведение: Изотропный

Модуль Юнга: 2,240 ГПа

Коэффициент Пуассона: 0,38

Модуль сдвига: 805,000 МПа

Плотность: 1,060 г/см³

▼ Прочность

Предел текучести: 20,000 МПа

Предел прочности растяжения: 29,600 МПа

OK Отмена Применить

а)

Редактор материалов: Сталь, легированная

Identity Представление **Физические свойства**

▼ Информация

Имя: Легированная сталь

Описание: Объект конструкционно...

Ключевые слова: конструкционный, металл

Тип: Металл

Подкласс: Металл/Сталь

Источник: Autodesk

URL-адрес:

▼ Базовые температурные

Теплопроводность: 4,500E+01 Вт/(м·К)

Удельная теплоемкость: 0,480 Дж/(г·°C)

Коэффициент теплового расширения: 12,000 мкм/(м·°C)

▼ Механические

Поведение: Изотропный

Модуль Юнга: 205,000 ГПа

Коэффициент Пуассона: 0,30

Модуль сдвига: 80000,000 МПа

Плотность: 7,730 г/см³

▼ Прочность

Предел текучести: 250,000 МПа

Предел прочности растяжения: 400,000 МПа

Термообработка

б)

Рисунок 2.18 – Фізичні властивості ABS пластику

Обираємо двигуни серії Nema з крутними моментами 0,17 та 0,6 Н*м.

Маркування цих двигунів відповідно: FL42STH25-0404B та FL42STH60-1206. Проектуємо та визначаємо приблизну масу ланок (рис. 2.19).

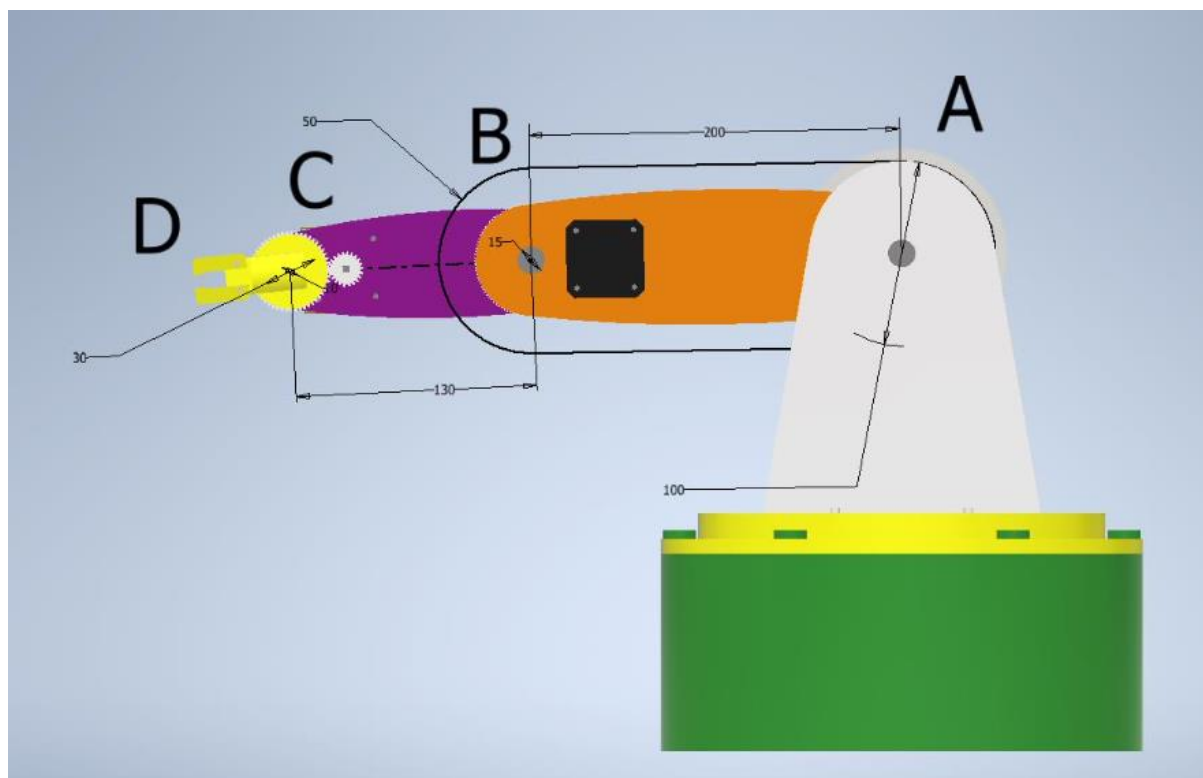


Рисунок 2.20 – Попередньо спроектовані ланки

3.1 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ МАНІПУЛЯТОРА

3.1 Вибір програмного забезпечення для моделювання та керування

Для виконання даного проєкту було обрано Autodesk Inventor, оскільки це програмне забезпечення надає високий рівень контролю та точності при проєктуванні складних механічних систем. Інструменти 3D CAD моделювання в Inventor ідеально підходять для створення детальних компонентів і асамблеїв, що є критично важливим для точного та ефективного функціонування маніпулятора. Також, можливість проведення комплексних аналізів та симуляцій у цьому програмному забезпеченні дозволяє перевіряти різні робочі сценарії та оптимізувати конструкцію перед фінальним виробництвом, що є незамінним для забезпечення надійності та довговічності маніпулятора [14].

Основні можливості Autodesk Inventor:

- 3D-CAD моделювання: Inventor пропонує потужні інструменти для параметричного, безпосереднього та вільного формату моделювання, що дозволяє розробляти складні деталі та асамблеї з високою точністю;
- інтеграція з AutoCAD: Inventor легко інтегрується з AutoCAD, дозволяючи імпортувати та експортувати проєкти між цими платформами, що забезпечує гнучкість у роботі з 2D та 3D проєктами;
- симуляція та аналіз: програма включає інструменти для аналізу напружень, динамічного руху та теплового аналізу, що допомагає інженерам перевіряти проєктні рішення перед виробництвом;
- автоматизація дизайну: Inventor пропонує засоби для створення спеціалізованих інструментів автоматизації, які можуть допомогти прискорити повторювані задачі проєктування;
- робота з великими асамблеями: Inventor ефективно обробляє великі зібрання, що забезпечує стабільну роботу навіть при роботі з великими

проектами;

- співпраця та обмін даними: підтримка різних форматів файлів та інтеграція з хмарними сервісами, як Autodesk 360, забезпечує ефективну співпрацю в команді.

Переваги Autodesk Inventor:

- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс: Inventor розроблений з урахуванням потреб інженерів, з легко зрозумілими інструментальними панелями та налаштуваннями;

- гнучкість у роботі: завдяки широкому спектру інструментів, Inventor дозволяє адаптуватися до різних інженерних проектів та вимог;

- підтримка комплексного проектування: від простих виробів до складних машин та механізмів, Inventor може впоратися з широким діапазоном інженерних задач.

Вибір Autodesk Inventor для розробки трьохланкового маніпулятора заснований на кількох ключових перевагах, які це програмне забезпечення надає. Autodesk Inventor відомий своїми потужними можливостями параметричного моделювання [14]. Можна легко змінювати параметри конструкції, такі як розміри, форми та розташування компонентів, при цьому програма автоматично оновлює всі залежні елементи. Autodesk Inventor інтегрований з іншими продуктами Autodesk, зокрема з AutoCAD, що значно спрощує обмін даними між різними фазами проектування. Ця інтеграція дозволяє легко переносити 2D-чертежі в 3D-моделі і навпаки, забезпечуючи гладке взаємодія між різними етапами розробки та виробництва [4].

Inventor ефективно управляє великими асамблеями, що важливо при розробці складних машин, таких як маніпулятори. Підтримка великої кількості деталей та складність зібрань вимагають потужних інструментів для управління проектними даними, які Inventor надає.

3.2 Розробка алгоритму керування маніпулятором

3.2.1 Постановка задачі

Дослідження зосереджено на розробці оптимізованих конструкційних рішень для маніпулятора, що використовується у промислових застосуваннях. Завдання полягає у визначенні оптимальних параметрів для елементів маніпулятора, з метою забезпечення його максимальної ефективності та надійності під час роботи. Це включає аналіз напружень, що виникають в критичних точках конструкції, на основі статичного та динамічного навантаження.

3.2.2 Мета дослідження

Метою дослідження є ідентифікація слабких місць в конструкції маніпулятора та вдосконалення його дизайну для підвищення міцності та довговічності при збереженні заданих габаритів та функціональності. Основна увага приділяється зменшенню ризиків виникнення поломок і деформацій при експлуатації.

Налаштування параметрів розрахункової моделі «Аналіз напружень» є ключовим для вибору оптимальних проектних рішень при розробці деталей або механізмів. На початкових стадіях проектування, цей аналіз дозволяє пересвідчитися в тому, що механізм або вузол буде працювати безвідмовно і без деформацій в передбачуваних умовах [15].

На вкладці «Аналіз напружень» ми виконаємо моделювання за допомогою параметрів, необхідних для оцінки зусиль та деформацій у шпинделі під дією сталого зовнішнього навантаження (рис. 3.1 – рис. 3.2).

Використовуючи статичний аналіз, досліджуємо еластично-деформований стан за наступними етапами:

1. Виявлення та усунення мод жорсткого тіла – дозволяє знайти рішення для статичної або динамічної рівноваги, яке задається навантаженнями;

2. Розподіл поперечних напружень контактних поверхонь – перевіряє наявність інформації про переривчасті напруження у точках контакту, що є актуальним для моделей збірок, але не застосовується для окремих деталей. Залишаємо за замовчуванням допуск з'єднувача оболонки. Тип контакту вибираємо Ковзання/Без поділу, оскільки це сприяє відносному ковзанню між контактними гранями та запобігає їхньому розділенню.

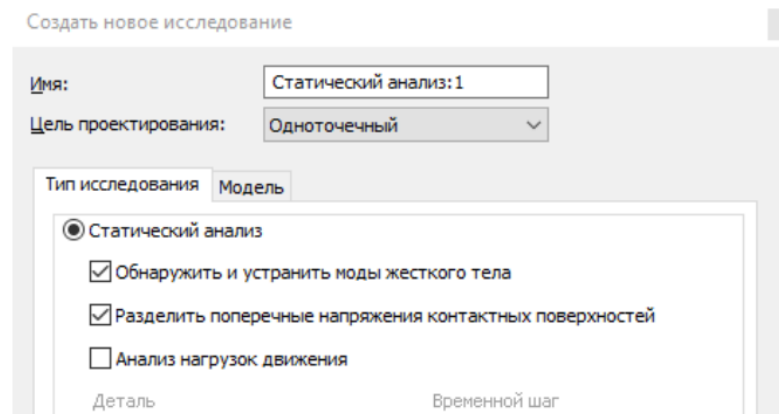


Рисунок 3.1 – Тип дослідження

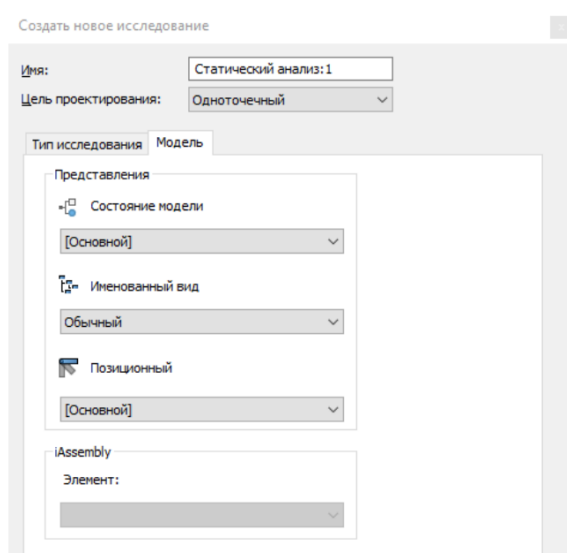


Рисунок 3.2 – Параметр моделі

3.2.3 Алгоритм керування маніпулятором

– Створення аналізу напружень на вкладці «Аналіз напружень»: встановлення параметрів моделювання необхідних для визначення зусиль та

деформацій в шпинделі при сталій дії зовнішнього навантаження. Вибір типу моделювання для проведення статичного аналізу для виявлення жорстких режимів тіла та аналізу поперечних напружень на контактних поверхнях [15].

- Спрощення складальної моделі: виключення незначних геометричних елементів, що не схильні до концентрації напружень для оптимізації процесу створення сітки та зменшення часу аналізу.

- Налаштування фіксації та накладання навантажень: фіксація корпусу маніпулятора та накладання попередньо знайдених сил (F_1 до F_4) та крутного моменту на конструкцію.

- Перевірка та перепризначення матеріалів для дослідження: здійснення оцінки використаних матеріалів у моделі та, за потреби, їх заміна на більш підходящі варіанти для досягнення кращих результатів аналізу.

- Налаштування контактів між деталями: створення контактів у збірці для визначення залежностей між деталями та розподілу навантажень для запобігання взаємного проникнення деталей.

- Побудова сітки та запуск симуляції: налаштування параметрів сітки та проведення симуляції для оцінки деформацій та напружень у конструкції.

- Аналіз результатів симуляції: перегляд результатів дослідження для оцінки зміщень (X , Y , Z) та коефіцієнтів запасу міцності, особливо у критичних точках конструкції.

3.3 Тестування програмного забезпечення

Спрощення моделі полягає в виключенні з аналізу маловажливих геометричних елементів, які могли б ускладнити процес побудови сітки і не мають схильності до концентрації напружень. У даному випадку, конструкція була розроблена в спрощеному форматі з самого початку, що дозволяє оптимізувати робочий час у майбутньому (рис. 3.3).

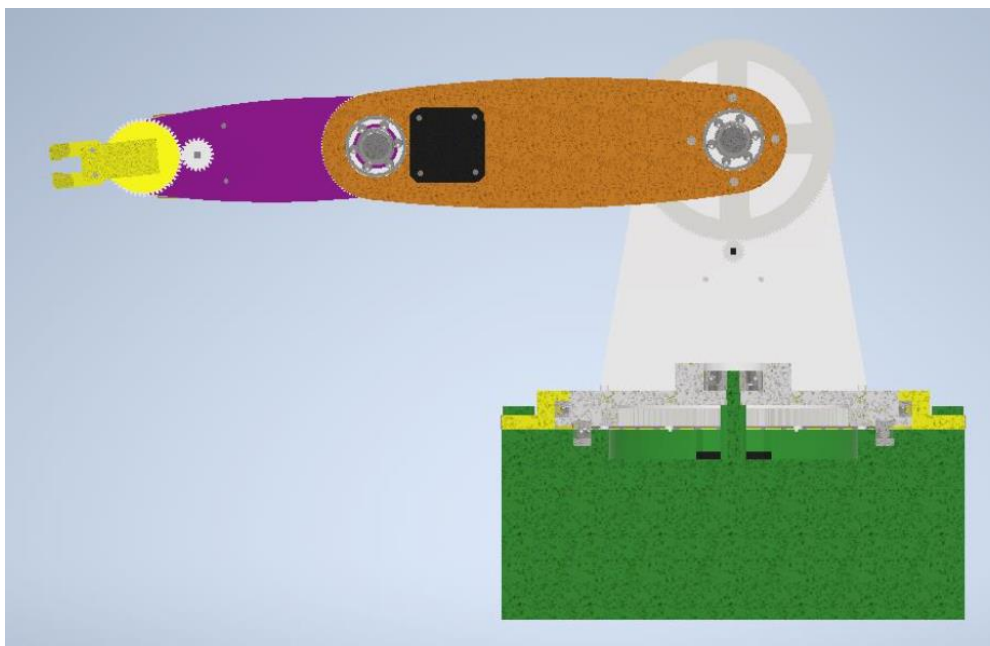


Рисунок 3.3 – Складальна модель робота

Оскільки корпус є нерухомим, ми можемо застосувати фіксацію до будь-якої з його поверхонь (рис. 3.4).

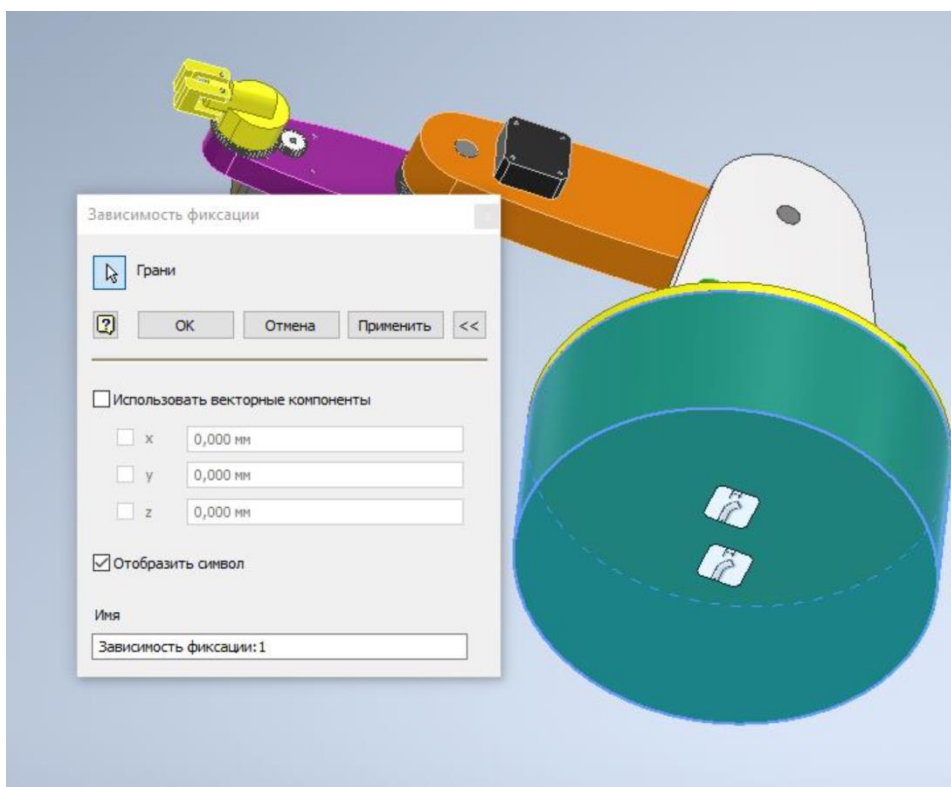


Рисунок 3.4 – Фіксація корпусу поворотної платформи

Накладаємо на конструкцію навантаження (рис. 3.5 – рис. 3.10).

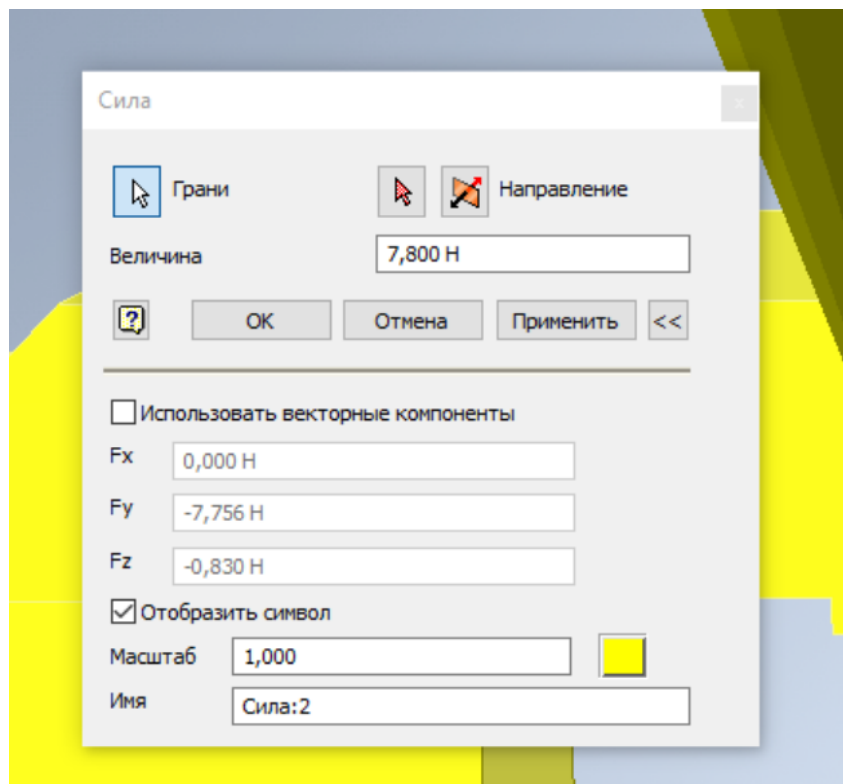


Рисунок 3.5 – Навантаження 1

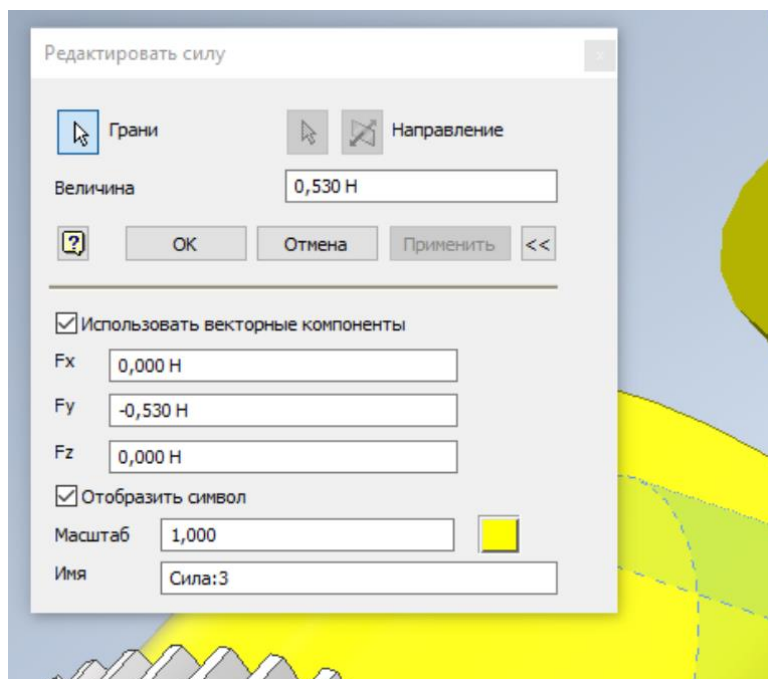


Рисунок 3.6 – Навантаження 2

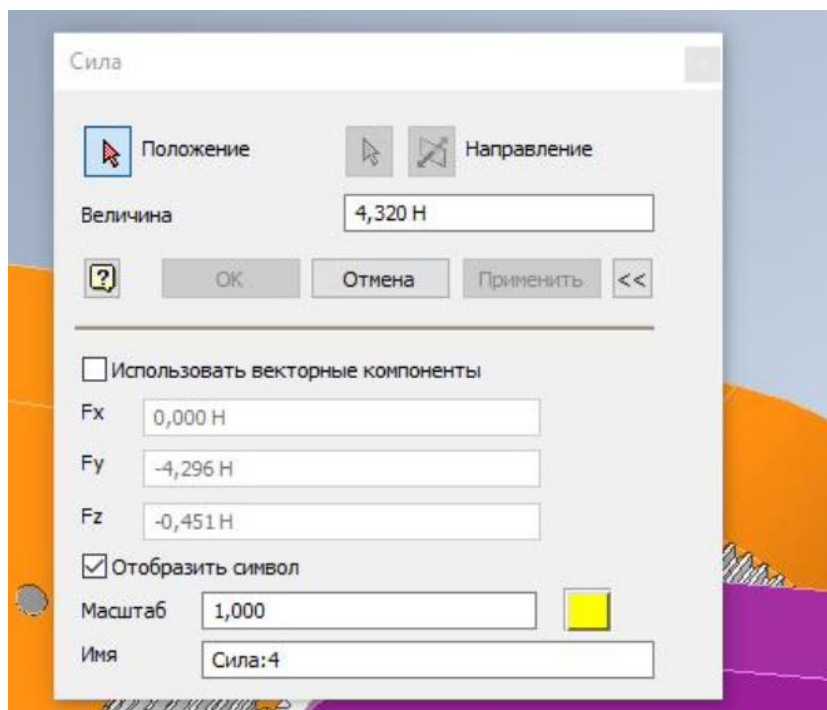


Рисунок 3.7 – Навантаження 3

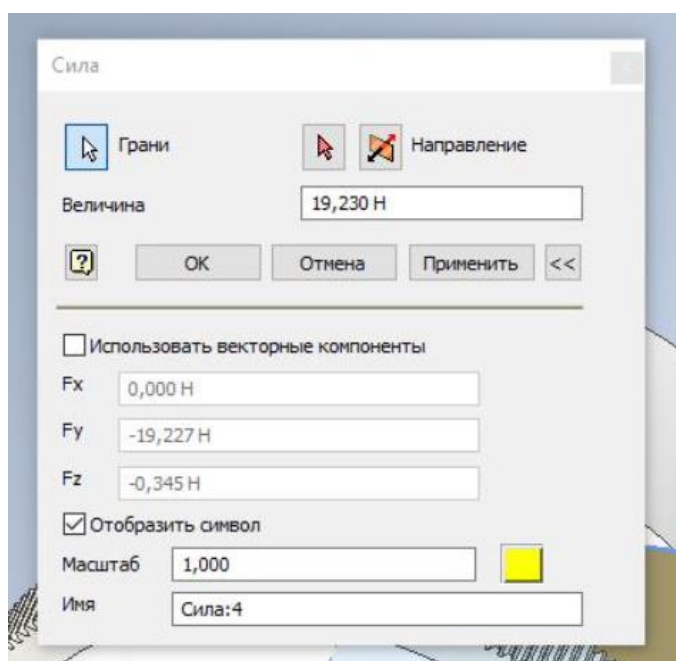


Рисунок 3.8 – Навантаження 4

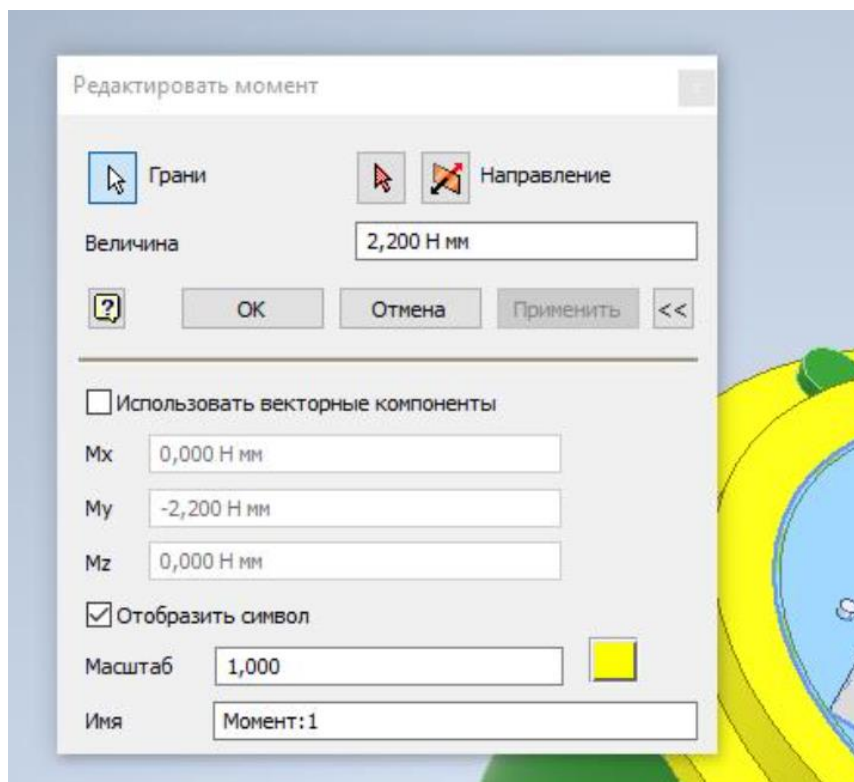


Рисунок 3.9 – Навантаження 5

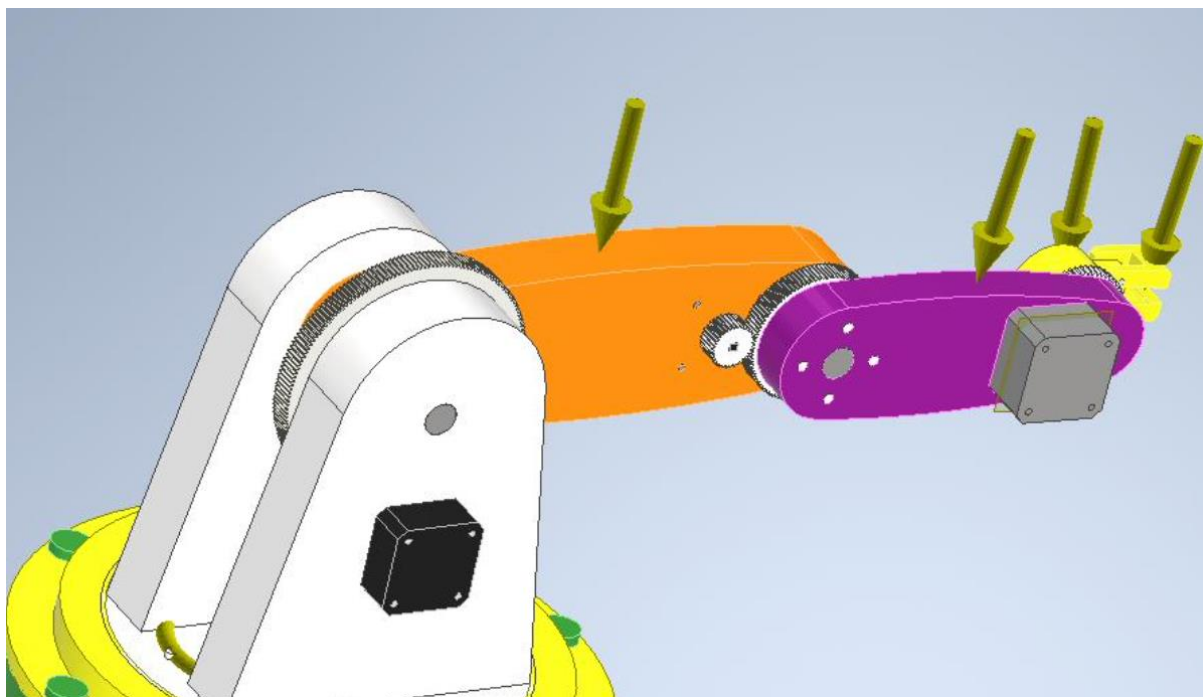


Рисунок 3.10 – Створені навантаження

Проведемо перевірку та при необхідності змінюємо матеріали, що використовуються в дослідженні (рис. 3.11).

SKF B7202 BE:1	Сталь, мягкая	Сталь, легированная	Предел текучести
ланка200:1	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
SKF B7202 BE:2	Сталь, мягкая	Сталь, легированная	Предел текучести
Лфнка130:1	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
SKF B7200 BE:1	Сталь, мягкая	Сталь, легированная	Предел текучести
частина50:1	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
Деталь ланки 50:1	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
Деталь ланки 50:2	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
Цилиндрическое зубчатое			
Цилиндрическое	Сталь	(как определено)	Предел текучести
Цилиндрическое	Сталь	(как определено)	Предел текучести
корпус мотора05:1	Сталь 45	(как определено)	Предел текучести
Цилиндрическое зубчатое			
Цилиндрическое	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
Цилиндрическое	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
штифт 5 мм пастик:1	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
штифт 5 мм пастик:2	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
штифт 5 мм пастик:3	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
штифт 5 мм пастик:4	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
ось В:1	Сталь 45	(как определено)	Предел текучести
штифт В 3мм:1	Сталь 45	(как определено)	Предел текучести
штифт В 3мм:2	Сталь 45	(как определено)	Предел текучести
штифт В 3мм:3	Сталь 45	(как определено)	Предел текучести
штифт В 3мм:4	Сталь 45	(как определено)	Предел текучести
мотор 015:1	Сталь 45	(как определено)	Предел текучести
Цилиндрическое зубчатое			
Цилиндрическое	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести
Цилиндрическое	Пластик АБС	(как определено)	Предел текучести

Рисунок 3.11 – Матеріали

Під час структурного аналізу збірки, що включає кілька компонентів, ми створюємо контакти для встановлення зв'язків між частинами. Ці контакти допомагають розподіляти навантаження між деталями та запобігають їх взаємному проникненню [15]. Вони також дозволяють симулювати взаємодію між об'єктами, які або розширюються, або стискаються під дією навантажень. Без налаштування контактів (рис. 3.12) елементи не можуть взаємодіяти один з одним під час моделювання.

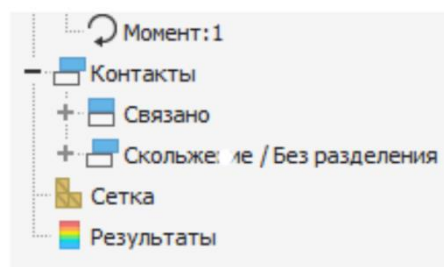


Рисунок 3.12 – Контакти в конструкції

Наступним кроком є побудова сітки (рис. 3.13) та запуск симуляції (рис. 3.14 – рис. 3.15).

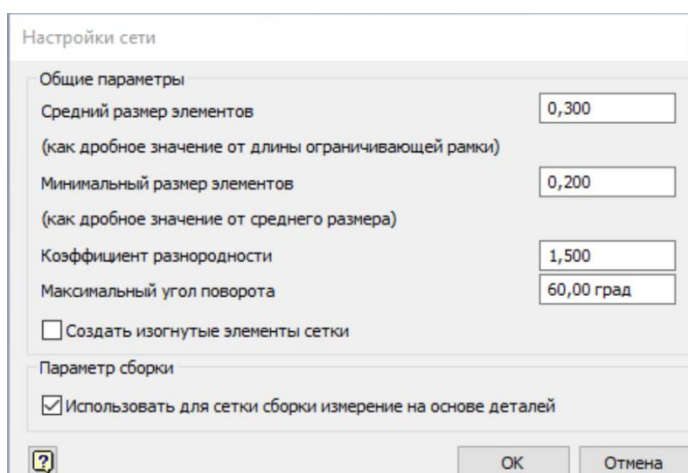


Рисунок 3.13 – Налаштування сітки

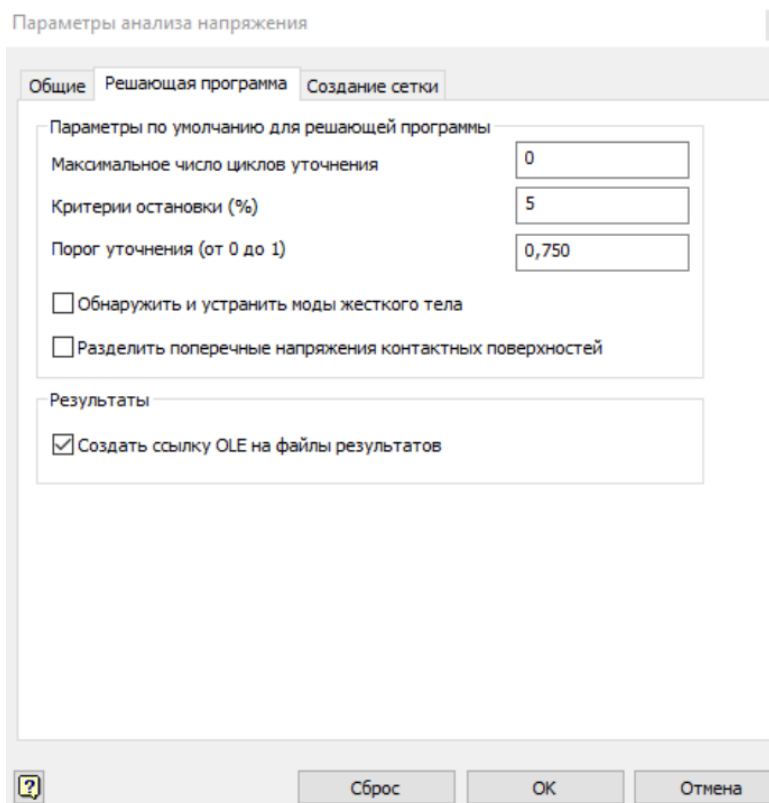


Рисунок 3.14 – Налаштування аналізу

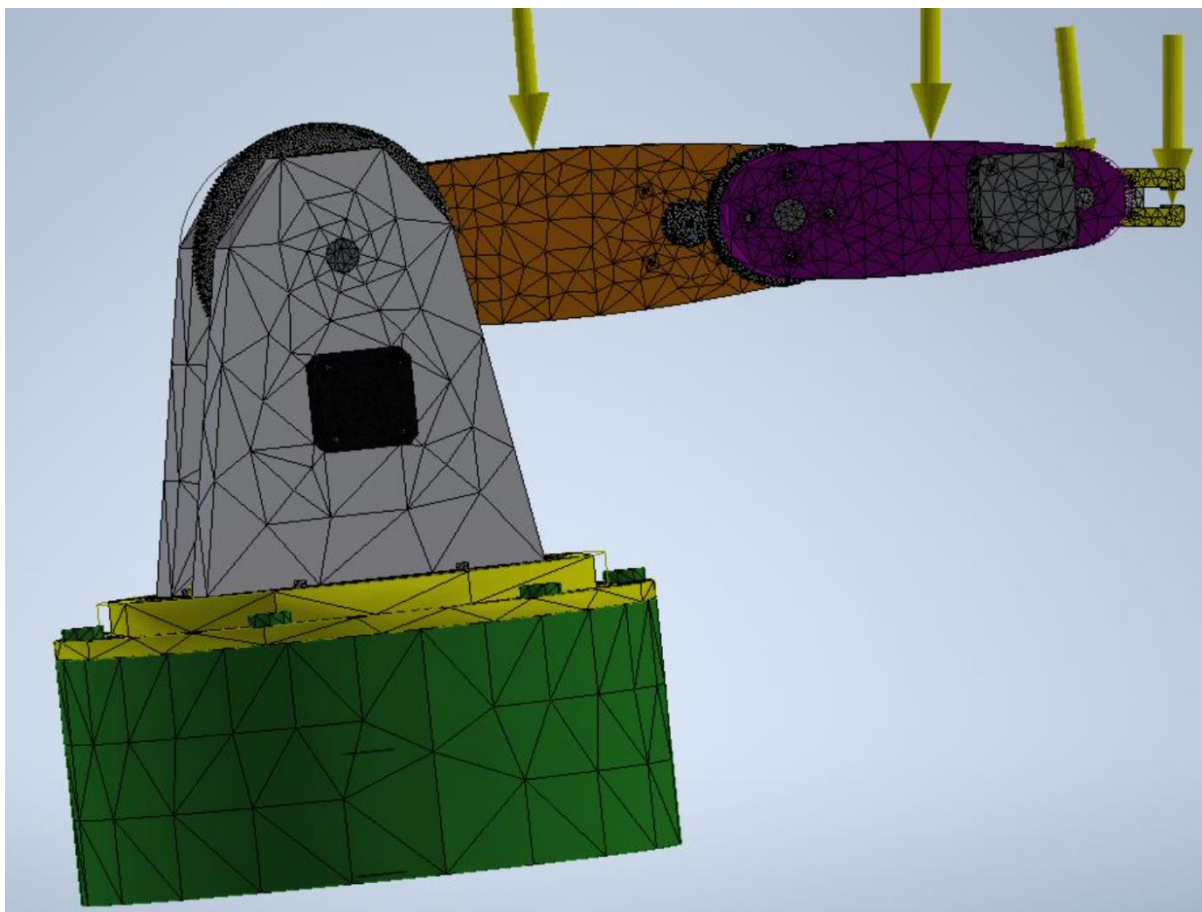


Рисунок 3.15 – Загальний вигляд сітки

Після прикладення всіх навантажень, налаштування контактів та побудови сітки запускаємо дослідження (рис. 3.16).

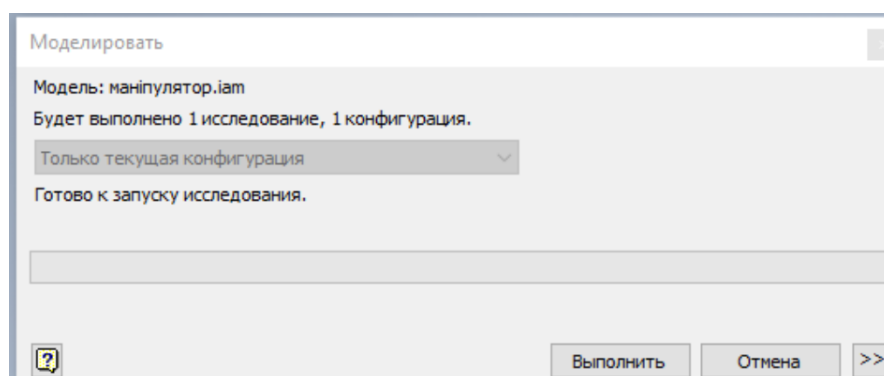


Рисунок 3.16 – Запуск дослідження

За результатами дослідження отримуємо наступні результати симуляції (рис. 3.17 – рис. 3.19).

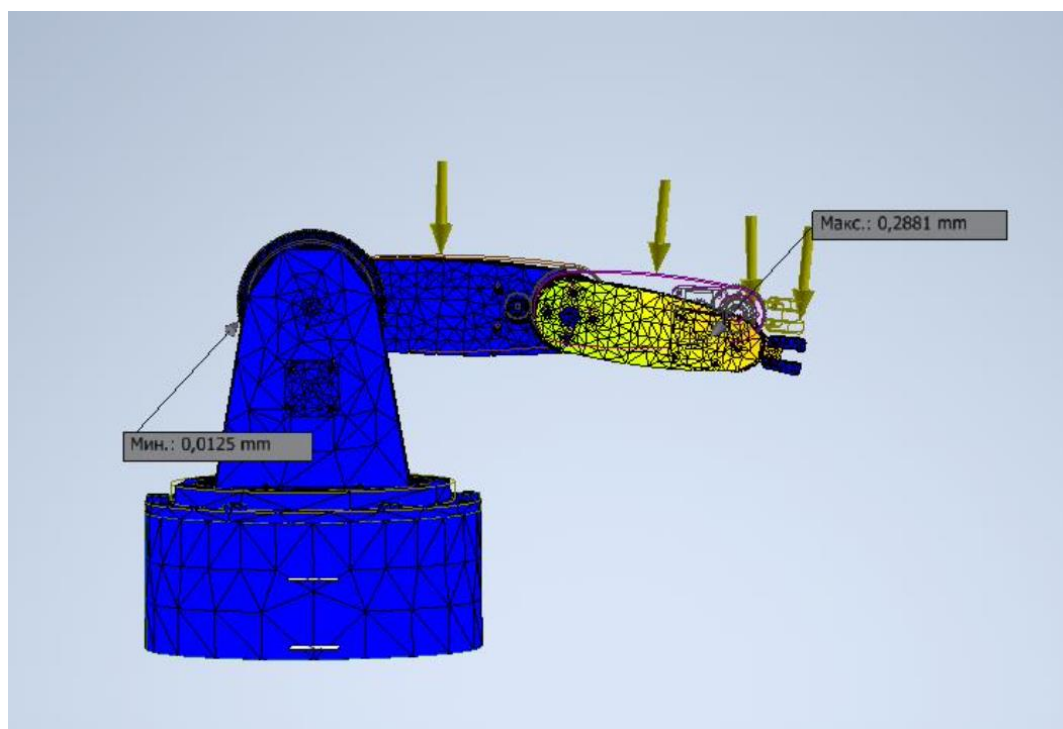


Рисунок 3.17 – Зміщення по X

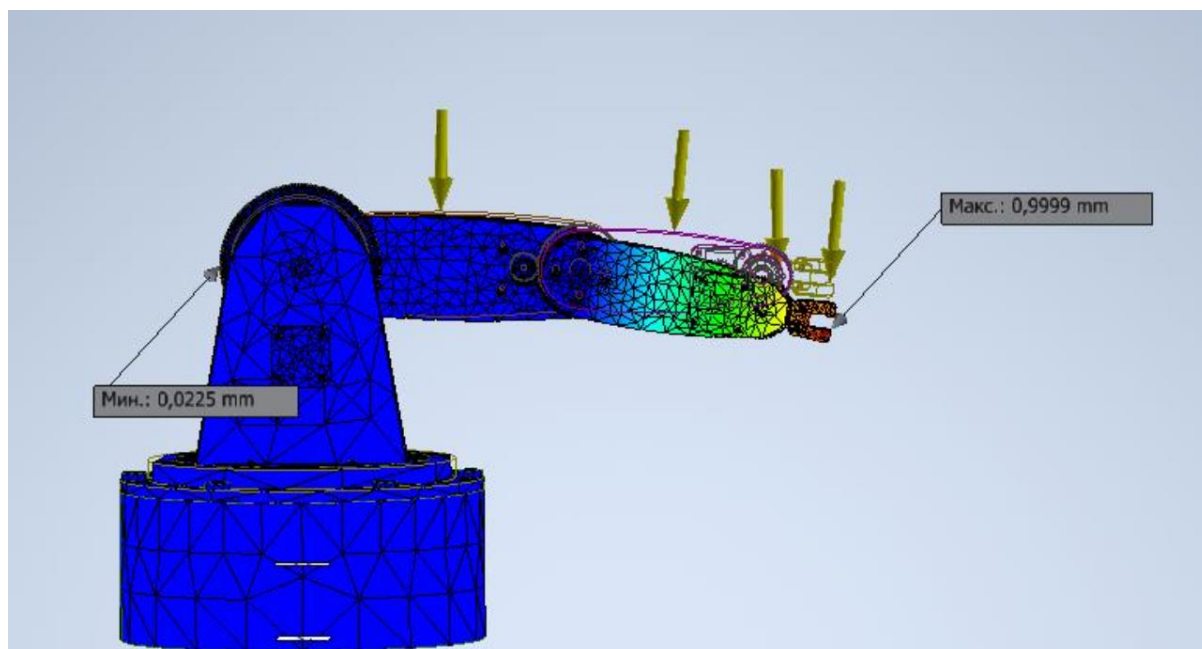


Рисунок 3.18 – Зміщення по Y

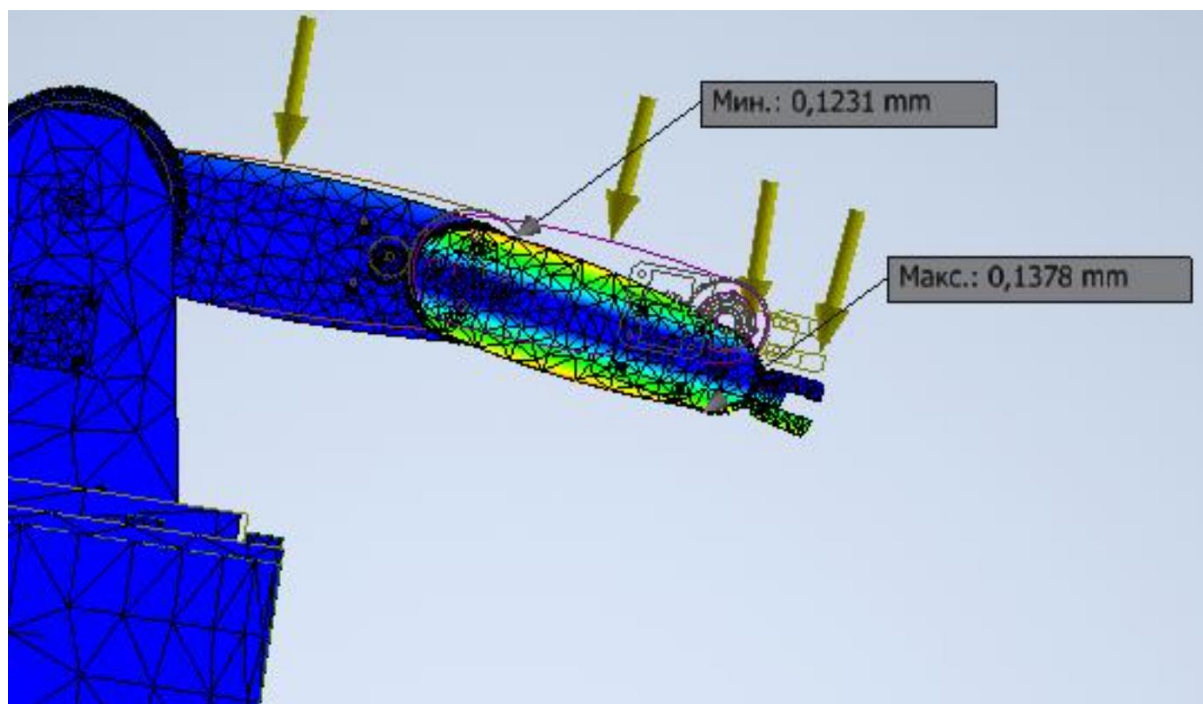


Рисунок 3.19 – Зміщення по Z

Далі розглядаються результати моделювання за коефіцієнтом запасу міцності, який відображає рівень напружень у конструкції рис. 3.20 – 3.22

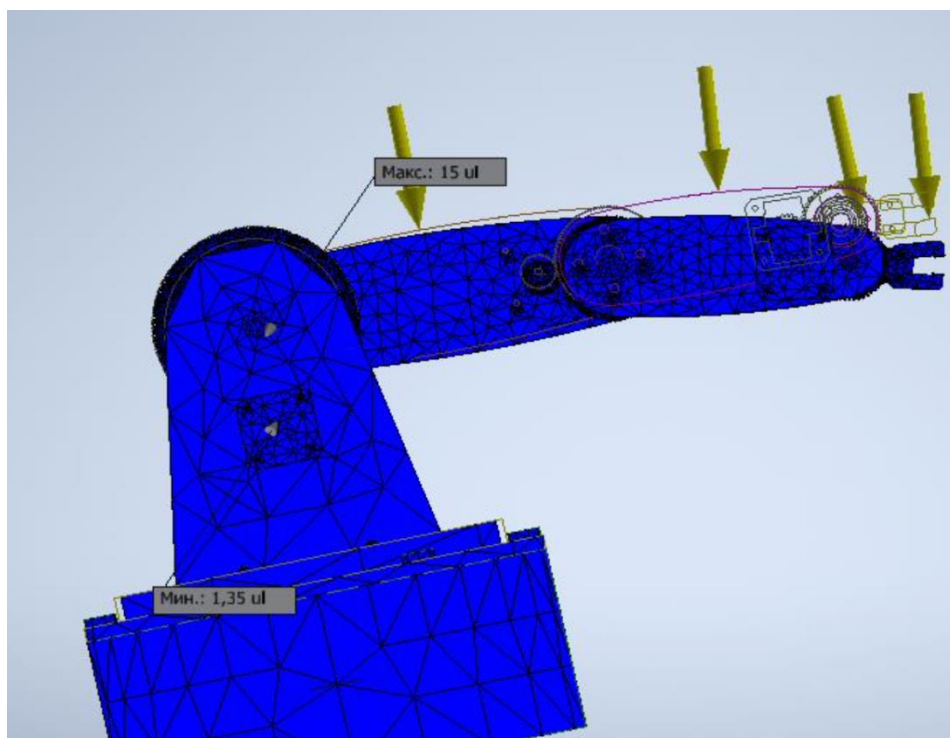


Рисунок 3.20 – Мінімальний та максимальний коефіцієнт запасу

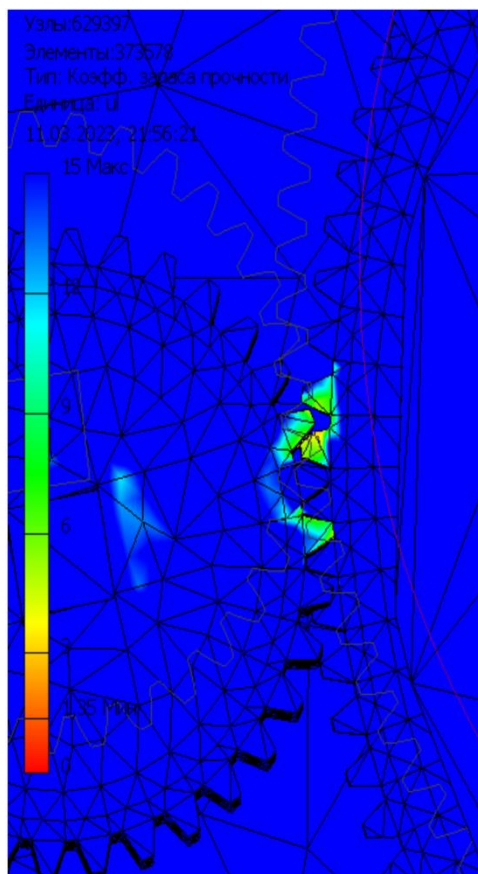


Рисунок 3.21 – Коэффициент запаса, зубчатая передача у точки В

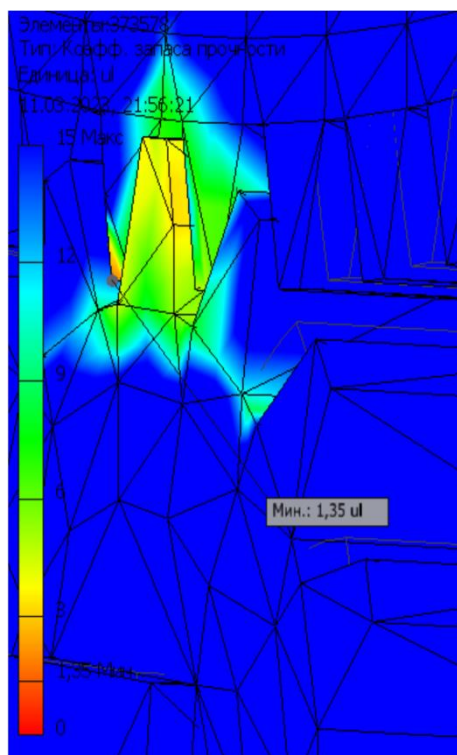


Рисунок 3.22 – Коэффициент запаса, зубчатая передача у точки А,
наибольшая нагруженная точка

З результатів дослідження випливає, що найвищі напруження спостерігаються в зубчастих передачах у точках А та В.

Щоб підвищити міцність у цих місцях, потрібно збільшити модуль зубчастих коліс. Проте збільшення модуля призведе до збільшення міжосьової відстані, що неприйнятно через обмеження за габаритами, задані в проекті.

Тому пропонується таке рішення: зменшення передаточних чисел за допомогою вибору потужнішого крокового двигуна, яке дозволить збільшити модуль зубчастих коліс без зміни міжосьової відстані.

3.4 Охорона праці

Охорона праці є критично важливою складовою при розробці та зборці трьохланкового маніпулятора з магнітними шарнірами. Цей розділ описує основні аспекти, які необхідно врахувати для забезпечення безпеки працівників під час монтажу даного обладнання. Перш ніж розпочати збірку маніпулятора, необхідно забезпечити чистоту і впорядкованість робочого місця. Робоче місце повинно бути зручно організоване, щоб уникнути непотрібних перешкод і мінімізувати ризики травматизму. Працівники повинні користуватися необхідними засобами індивідуального захисту, такими як захисні окуляри, рукавиці та спеціальний одяг, для захисту від потенційно небезпечних ситуацій під час роботи з механічними і електричними компонентами. Перед підключенням електричних компонентів необхідно переконатися у їх правильності та безпеці. Всі електричні з'єднання мають бути заземленими, а працівники повинні уникати проведення будь-яких робіт під напругою без необхідних захисних засобів. Забезпечення безпечного фіксування рухомих частин маніпулятора та використання захисних кожухів є обов'язковим для запобігання потенційним травмам від механічних ударів чи зіткнень. Робоче місце має бути обладнане вогнегасниками і мати план евакуації в разі виникнення пожежі. Процедури безпеки та інструкції щодо дій

у випадку надзвичайних ситуацій повинні бути зрозумілими і доступними для всіх працівників.

Дотримання всіх зазначених заходів охорони праці під час зборки трьохланкового маніпулятора з магнітними шарнірами є важливим для забезпечення безпечних умов праці та попередження нещасних випадків. Ретельне виконання вимог з охорони праці допоможе уникнути травм і забезпечити ефективну та безпечну роботу з обладнанням.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра був проведений аналіз предметної області та останніх досліджень, визначено актуальність роботи.

Було визначено та деталізовано мету та задачі проекту, написано технічне завдання та проведено планування робіт.

В роботі було обрано програмне забезпечення для моделювання та керування Autodesk Inventor, з огляду на його сумісність і ефективність в управлінні маніпулятором. Розробка алгоритму керування була зосереджена на максимізації точності та надійності роботи. Тестування програмного забезпечення продемонструвало його здатність адекватно відповідати на вимоги реальних умов експлуатації.

Розробка 3D-моделі трьохланкового маніпулятора з типовою модульною конструкцією та магнітними шарнірами дозволила практично оцінити потенційні переваги такого підходу. Проведене дослідження стійкості підтвердило високу надійність і ефективність такої конструкції у передбачених умовах експлуатації.

Ці результати надають цінну інформацію для подальшого розвитку та оптимізації робототехнічних систем, що може сприяти їх ширшому впровадженню в промислові та дослідницькі сфери.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Liu, Y., Xu, H., Geng, C., & Chen, G. (2017, December). A modular manipulator for industrial applications: Design and implement. In *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)* (pp. 331-335). IEEE.
2. Yang, H. D., & Asbeck, A. T. (2020). Design and characterization of a modular hybrid continuum robotic manipulator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(6), 2812-2823.
3. Xu, W., Han, L., Wang, X., & Yuan, H. (2021). A wireless reconfigurable modular manipulator and its control system. *Mechatronics*, 73, 102470.
4. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.
5. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. М. Цимбал, О. В. Токарева, А. І. Бронніков. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 66 с.
6. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
7. Робототехнічні системи: проектування і моделювання [Електронний ресурс]: навч. Посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» / М. М. Поліщук, М.М. Ткач; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 41,6 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с.
8. Конспект лекцій з дисципліни «Основи САПР РТС» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти усіх форм навчання,

спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньої програми «Системна інженерія» [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб. Демська Н.П., 2023. – 355 с.

9. Dai, Y., Xiang, C. F., Liu, Z. X., Li, Z. L., Qu, W. Y., & Zhang, Q. H. (2022). Modular Robotic Design and Reconfiguring Path Planning. *Applied Sciences*, 12(2), 723.

10. Jimenez, L., Demoly, F., Deng, S., & Gomes, S. (2020). Towards a Knowledge-Based Design Methodology for Modular Robotic System. In *Product Lifecycle Management Enabling Smart X: 17th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2020, Rapperswil, Switzerland, July 5–8, 2020, Revised Selected Papers 17* (pp. 50-58). Springer International Publishing.

11. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. 3-тє вид., переробл. і доповн. Дніпро: НГУ, 2017. 224 с.

12. Невлюдов І. Ш. Механізми технічних засобів автоматизації. Довідкові матеріали з курсового і дипломного проектування: навч. посібник / І. Ш. Невлюдов, В. І. Роменський, І. О. Яшков; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 292 с. – ISBN ISBN 978-966-659-301-9.

13. Al-Qbilat, M. M. I. (2022). Accessibility requirements for human-robot interaction for socially assistive robots. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94274-2_29.

14. Pal, R., Mitra, S., Rahul, & Kanaujia, N. (2022, August). Modelling and Stress Analysis of Connecting Rod Using Fusion 360. In *Biennial International Conference on Future Learning Aspects of Mechanical Engineering* (pp. 235-247). Singapore: Springer Nature Singapore.

15. Alizade, R., Soltanov, S., & Hamidov, A. (2021). Structural synthesis of lower-class robot manipulators with general constraint one. *Robotics*, 10(1), 14.