

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
 Кафедра _____ КІТАМ _____
 Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
 Спеціальність _____ 172 Телекомунікації та радіотехніка _____
 Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
 Освітня програма _____ Інтелектуальні технології мікросистемної
 радіоелектронної техніки _____

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ _____

(підпис)

«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Ігнатенко Дар'ї Володимирівні _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Модернізація комутаційної системи мобільної
 робототехнічної платформи з використанням поліімідних структур _____

Затверджена наказом по університету від 08.11.2021 № 1696 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Дослідити комутаційну систему мобільної робототехнічної платформи;

3.2 Середовище для імітаційного моделювання – Comsol Multiphysics; _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ _____

4.2 Аналіз технічного завдання; _____

4.3 Аналіз існуючих мобільних робототехнічних платформ; _____

4.4 Аналіз конструктивних особливостей робототехнічних платформ; _____

4.5 Аналіз поліімідних структур і їх призначення; _____

4.6 Моделювання 3D-моделі комутаційної системи мобільної
 робототехнічної платформи; _____

4.7 Висновки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 21 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	Аналіз технічного завдання	08.11.2021	виконала
2	Аналіз існуючих мобільних робототехнічних платформ	10.11.2021	виконала
3	Аналіз конструктивних особливостей робототехнічних платформ	15.11.2021	виконала
4	Аналіз поліімідних структур і їх призначення	18.11.2021	виконала
5	Моделювання та дослідження 3D-моделі комутаційної системи мобільної робототехнічної платформи	20.11.2021	виконала
6	Розробка математичної моделі параметрів гнучких комутаційних структур	25.11.2021	виконала
7	Оформлення пояснювальної записки	28.11.2021	виконала
8	Перевірка керівником роботи	29.11.2021	виконала
9	Нормоконтроль	30.11.2021	виконала
11	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichek	04.12.2021	виконала
12	Подання роботи на рецензію	07.12.2021	виконала
13	Подання роботи на підпис зав. кафедри	09.12.2021	виконала
14	Подання роботи до ЕК	14.12.2021	виконала

Дата видачі завдання 08.11.2021

Студент _____
(підпис)

Ігнатенко Д. В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Жарікова І. В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 60 с., 20 рис., 1 табл., 26 джерел.

ІНДУСТРІЯ 4.0, МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, КОМУТАЦІЙНА СИСТЕМА,
ПОЛІІМІДНІ СТРУКТУРИ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

Об'єкт дослідження – комутаційні процеси в апаратній частині мобільних робототехнічних платформ.

Предмет дослідження – комутаційна система мобільної робототехнічної платформи на основі гнучких поліімідних структур.

Мета кваліфікаційної роботи – моделювання параметрів гнучких поліімідних структур у складі рухомих робототехнічних платформ.

У ході виконання кваліфікаційної роботи проаналізовано існуючі мобільні робототехнічні платформи та визначено їх конструктивні особливості.

Проведено аналіз поліімідних структур і їх призначення.

Виконано підбір компонентів комутаційної системи для робототехнічної платформи та розроблено схему комутаційних зв'язків.

Побудовано 3D-модель комутаційної системи мобільної робототехнічної платформи у середовище COMSOL Multiphysic та проведено дослідження конструкції.

ABSTRACT

Explanatory note: 60 p., 20 pictures, 1 table, 26 sources.

INDUSTRY 4.0, MOBILE ROBOT, SWITCHING SYSTEM, POLYIMIDE STRUCTURES, MODERNIZATION.

The object of research is switching processes in the hardware of mobile robotic platforms.

The subject of research is a switching system of a mobile robotic platform based on flexible polyimide structures.

The purpose of the qualification work is to model the parameters of flexible polyimide structures as part of mobile robotic platforms.

During the qualification work the existing mobile robotic platforms were analyzed and their design features were determined.

The analysis of polyimide structures and their purpose is carried out.

The selection of switching system components for the robotic platform has been performed and the scheme of switching connections has been developed.

A 3D model of the switching system of a mobile robotic platform in the COMSOL Multiphysic environment was built and a design study was performed.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз предметної області.....	11
1.1 Аналіз технічного завдання.....	11
1.2 Класифікація та особливості РТС.....	12
1.2.1 Маніпуляційні РТС.....	12
1.2.2 Мобільні системи.....	14
1.2.3 Інформаційно-керуючі РТС.....	18
1.3 Типи управління робототехнічними системами.....	19
1.4 Гнучкі поліімідні структури як елементи комутаційної системи.....	21
1.5 Висновки до розділу.....	23
2 Вибір конструкції ГКС.....	24
2.1 Призначення та схема мобільного робота.....	24
2.2 Вибір гнучкого шлейфу.....	26
2.2.1 З'єднувачі FPC для плоских плівкових кабелів.....	26
2.2.2 З'єднувачі Micro-Match для плоских кабелів.....	27
2.2.3 З'єднувачі для плоских кабелів AMP-Latch.....	28
2.3 Вибір комутаційних зв'язків для моделювання.....	29
2.4 Висновки до розділу.....	30
3 Експериментальні дослідження.....	31
3.1 Вибір засобу та методу моделювання.....	31
3.2 Розробка імітаційної моделі комутаційної системи мобільної робототехнічної платформи.....	38
3.3 Дослідження показника електричного струму та розрахунок електричних полів на провідних та діелектричних оболонках.....	44
3.4 Дослідження опору контактів.....	47
3.5 Висновки до розділу.....	51

	7
4 Охорона праці.....	53
Висновки.....	55
Перелік джерел посилання.....	57

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

FPC – flexible printed circuit;

ГКС – гнучка комутаційна структура;

ГМХ – габаритно-масові характеристики;

МСТ – мікросистемна техніка;

РТС – робототехнічна система.

ВСТУП

На сьогодні мобільна робототехніка займає все більшу роль у нашому житті та в різних галузях суспільства. Роботи використовуються в самих різних областях: в автомобільній, медичній, військовій, космічній промисловості та у побуті.

На даний час велика увага приділяється розробці робототехнічних комплексів з високою пристосованістю до руху по складних траєкторіях і складних поверхнях.

Мобільні роботи також можуть бути автономними, які здатні самостійно керуватися у неконтрольованому середовищі без додаткових електромеханічних приладів. Вони є гнучкими та швидкими у впровадженні тому, що вони можуть легко адаптуватися та рекомендувати свої параметри налаштувань про можливі шляхи вирішення завдань, які будуть поставлені перед роботом. У наш час робототехнічні системи все більше інтегруються в людське суспільство та стають невід'ємною його частиною.

Проте розробка даних систем ще стоїть на початковому рівні розвитку, що в свою чергу робить дані системи не досконалими та залежними від навколишнього середовища та інших чинників, що можуть впливати на їх роботу.

У кваліфікаційній роботі магістра висвітлюється тема про моделювання комутаційної системи мобільної робототехнічної платформи з використанням поліімідних структур.

Мета кваліфікаційної роботи – моделювання параметрів гнучких поліімідних структурах у складі рухомих робототехнічних платформ.

Об'єкт дослідження – комутаційні процеси в апаратній частині мобільних робототехнічних платформ.

Предмет дослідження – комутаційна система мобільної робототехнічної платформи на основі гнучких поліімідних структур.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати існуючі мобільні робототехнічні платформи;
- визначити конструктивні особливості робототехнічних платформ;
- проаналізувати поліімідні структури і їх призначення;
- проаналізувати аналоги та визначити, які компоненти підходять для комутаційної системи;
- виконати підбір компонентів комутаційної системи для робототехнічної платформи та розробити схему комутаційних зв'язків;
- побудувати 3D-модель комутаційної системи мобільної робототехнічної платформи у середовищі COMSOL Multiphysics;
- виконати моделювання комутаційних процесів за допомогою середовища COMSOL Multiphysics;
- розробити математичну модель параметрів гнучких комутаційних структур.

Використання мікроелектронних засобів у виробах різного призначення не тільки приводить до підвищення техніко-економічних показників виробів (вартості, надійності, споживаної потужності, габаритних розмірів) і дозволяє багаторазово скоротити терміни розробки, а й надає їм принципово нові споживчі якості (розширені функціональні можливості, адаптивність і т. д.), отже тема роботи є актуальною.

Кваліфікаційна робота виконана згідно з [1], [2].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз технічного завдання

Згідно вимог технічного завдання (ТЗ) у ході кваліфікаційної роботи необхідно виконати моделювання параметрів у гнучких поліімідних структурах у складі рухомих робототехнічних платформ.

Основна область застосування роботів – є галузь, а точніше, галузі 4.0, де використовуються так звані промислові роботи.

Сьогодні існує велике різноманіття мобільних робототехнічних платформ різного призначення. У світі нараховується близько 800 тисяч мобільних роботів, що класифікуються за різними ознаками, такими, наприклад, як підсистема переміщення, тип цільового середовища, тип енергозабезпечення, призначення та інші. Серед усього цього різноманіття на окрему увагу заслуговують системи розподіленої робототехніки або колективи мобільних робототехнічних агентів. Агенти у складі цих колективів розв'язують задачі просторової самоорганізації шляхом виконання певних алгоритмів колективної поведінки. Алгоритми колективної поведінки працюють на основі деяких вхідних даних, які вони отримують від відповідних підсистем робототехнічного агента. Результатом роботи алгоритму є деякі вихідні дані (команди), які, як правило, виконуються підсистемою переміщення робототехнічного агента. Наприклад, вхідними даними можуть бути: місцезнаходження агента, розташування інших агентів колективу, певні дані про середовище (наприклад, температура повітря або вологість) і т. д.; вихідними даними можуть бути: координати точки простору, до якої повинен прямувати агент, напрямок руху, швидкість руху тощо. Вхідні та вихідні дані алгоритму залежать від типу робототехнічної платформи агента, у межах якої він виконуватиметься.

1.2 Класифікація та особливості РТС

Робот – це автономна машина, здатна відчувати своє середовище, виконувати обчислення для прийняття рішень і виконувати дії в реальному світі.

Мобільні роботи – призначені для виконання тільки транспортних операцій з перевезення вантажів (робокари), часто не мають маніпуляторів, а забезпечуються спрощеними одне- і двоступеневих вантажно-розвантажувальними пристроями, або останні операції виконуються стаціонарними маніпуляторами, що знаходяться в місцях зупинки транспортних роботів.

Мобільні роботи, що включають в себе чутливі елементи, виконавчі механізми, комп'ютери і володіють елементами штучного інтелекту, представляють досить зручний об'єкт для постановки, вивчення і знаходження рішень сучасних проблем мехатроніки [3].

1.2.1 Маніпуляційні РТС

Промислові роботи, відносяться до класу маніпуляційних роботів.

Промисловий робот – це автоматична машина, стаціонарна чи пересувна, що складається з виконавчого пристрою у вигляді маніпулятора, який має кілька степенів вільності, перепрограмувального пристрою, і програмного керування для виконання у виробничому процесі рухових і керуючих функцій. Для робота характерна перепрограмованість – властивість промислового робота замінити керуючу програму автоматично чи за допомогою людини-оператора [4].

Наприклад, робот-фрезерувальник KUKA (рис. 1.1). Фрезерування служить для надання заготівлі необхідної форми шляхом видалення зайвого матеріалу за допомогою різця певного виду в результаті обертання ріжучого інструменту. Фрезерні роботи KUKA допомагають зробити виробничий процес більш гнучким. Високоточне роботизоване фрезерування – один з

основних напрямків спеціалізації компанії KUKA: роботи здатні обробляти деталі з вуглепластику та склопластику з точністю до $\pm 0,4$ мм [5].

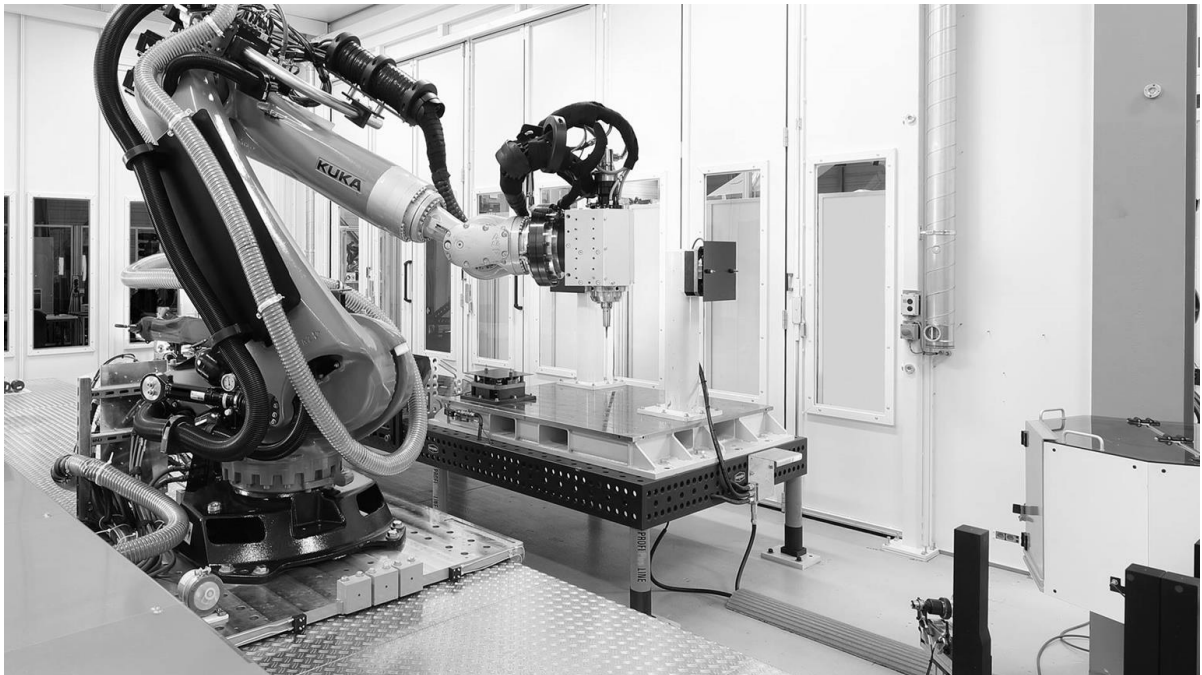


Рисунок 1.1 – Промисловий робот KUKA

До перепрограмування відноситься зміна послідовності і значення переміщень по ступенях рухливості і керуючих функцій за допомогою засобів керування на пульті пристрою керування. Завдяки наявності декількох степенів вільності і гнучкої системи керування, що легко переналагоджується на виконання різних програм руху маніпулятора, робот є багатофункціональною машиною. Це відповідає вимогам гнучкого переналагоджування виробництва на різні технологічні процеси. З цією метою роботи доцільно сполучити з таким технологічним устаткуванням, яке оснащено числовим програмним керуванням (ЧПК), яке також легко переналагоджується. Роботи виготовляються в наземному, підвісному і порталному виконаннях. Невеликі роботи можуть бути настільними або встановленими безпосередньо на об'єкті устаткування, наприклад, на станині токарного верстата. Для обслуговування двох або декількох верстатів робот може автоматично переміщатися по заданій програмі.

Найбільше поширення роботи одержали в машинобудівних і приладобудівних галузях. Але існує також тенденція комплексної автоматизації з застосуванням роботів в інших галузях промисловості (легкому, комп'ютерному, хімічному, будівельному, металургійному, вугле-, нафто-, гозодобувному) [4].

1.2.2 Мобільні системи

Мобільні робототехнічні системи відрізняються наявністю рухомого шасі з автоматично керованими приводами. Вони можуть бути колісними, ходячими, колісно-ходячими і гусеничними. Існують також плаваючі і літаючі мобільні робототехнічні системи. Часто мобільні машини несуть на собі маніпуляційні роботи і можуть застосовуватися в польових умовах, в космічних польотах, на промислових підприємствах, а також у будівництві і на транспорті. На заводах багато ручної роботи потрібно при транспортуванні деталей, матеріалів і інструментів в заводському цеху між верстатами і складами. Тут об'єктом робототехніки є створення автоматичних візків (робокарів), що рухаються в цеху по заданій програмі при керуванні від ЕОМ. Програма може легко переналагоджуватися. Це ж відноситься і до автоматичних підвісних транспортних роботів. Треба згадати і про автоматизацію усіх видів складських робіт за допомогою робототехнічних систем, коли робот автоматично обслуговує по програмі від ЕОМ різні осередки складу і прибуваючі до нього робокари [4].

Наприклад, мобільний робот для переміщення продукції без додаткової модифікації приміщення LD Omron (рис. 2.2). Автономна інтелектуальна машина для переміщення вантажів по складу чи будь-якому іншому приміщенню. Передбачено конструкції з різною вантажопідйомністю від 60 до 220 кг, просту інтеграцію, повну безпеку для людей та інтер'єру.



Рисунок 1.2 – Мобільний робот OMRON

Мобільні роботи Omron – це повністю автономні інтелектуальні машини, які підвищують продуктивність, скорочують час простою обладнання, усувають помилки, покращують відстеження матеріалів та дозволяють співробітникам зосередитись на завданнях, що потребують складних людських навичок [6].

Один з прикладів мобільних роботів, які у своєму складі мають ГКС, – це мобільний робот HeartLander [7], що рухається за допомогою мініатюрних ультразвукових п'єзоелектричних двигунів, для малоінвазивної кардіотерапії. Роботизована конструкція була розроблена як доказ концепції для демонстрації мобільності на поверхні серця (рис. 1.3).

Склад його апаратної частини:

- ультразвукові п'єзоелектричні двигуни використовуються для руху роботів через високі осьові зусилля, компактні розміри та властиву їм надійність. Хвилясті двигуни – це невеликі лінійні двигуни, які використовують найдрібніші обертальні рухи для обертання різьбового стрижня, забезпечуючи лінійне переведення стрижня з високою осьовою силою. У двигунах використовується гнучка друкована плата для живлення та зв'язку зі схемою керування двигуном, розташованою у підвісному корпусі;

- передній корпус містить два шарикопідшипники для забезпечення пасивних ступенів свободи обертання лінійних двигунів і порт для

терапевтичних інструментів. У задній частині корпусу розташовані два хвилясті лінійні двигуни 3,4-SQL, розташовані горизонтально пліч-о-пліч. До кожного різьбового стрижня прикріплений відрізок нітинолового дроту. Нітиноловий провід з'єднується з мініатюрними шарикопадшипниками на задній частині переднього корпусу;

– активація всмоктування у кожній камері регулюється електромагнітним клапаном. Графічний інтерфейс користувача управляє всіма функціями робота, включаючи управління двигуном і чергування всмоктування між двома тілами. Програма дозволяє керувати роботом за допомогою кнопок зі стрілками комп'ютерної клавіатури. Програма також дозволяє лікарю змінювати кілька параметрів пересування робота, включаючи довжину кроку та кількість кроків, забезпечуючи тим самим контроль за рухом робота [7].

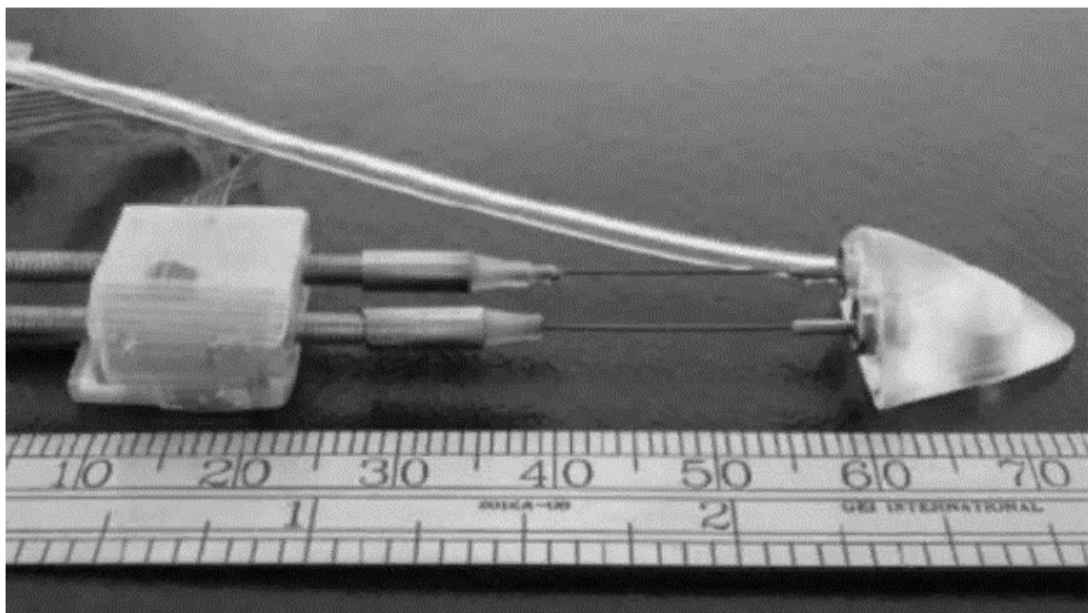


Рисунок 1.3 – Мобільний робот HeartLander

Автономний робот KMR iiwa придатний для співпраці з людиною та є мобільним. В одній системі він поєднує сильні сторони чутливого робота легкої конструкції LBR iiwa та мобільної автономної платформи. KMR iiwa не

прив'язаний до місця та гнучкий – ідеальна умова для виконання вимог Industrie 4.0.

KMR розшифровується як KUKA Mobile Robotik (мобільна робототехніка KUKA). KMR iiwa – це комбінація з чутливого робота легкої конструкції LBR iiwa та мобільної гнучкої платформи. Як свідчать назва та окремі компоненти, KMR iiwa відрізняється високою мобільністю та гнучкістю. Модульна система KMR iiwa (рис. 1.4) забезпечує ряд можливостей комбінування технології робота, мобільних платформ і промислових компонентів. Сім спеціальних датчиків шарнірного моменту на кожній осі робота легкої конструкції LBR iiwa роблять його чутливим до свого оточення.

Він переміщається безпечно і без захисного огороження – при будь-якому зовнішньому контакті він зупиняється.

Спеціально розроблені колеса Ілона дозволяють мобільній платформі виконувати багатоспрямовані переміщення та обертання на 360 °. Колесо складається з кількох роликів, розташованих під кутом 45 ° до осі. Така максимальна рухливість скорочує час пересування та запобігає простоям у виробничому процесі.

Живлення транспортного засобу та робота здійснюється безпосередньо за рахунок літій-іонних акумуляторних батарей [8].

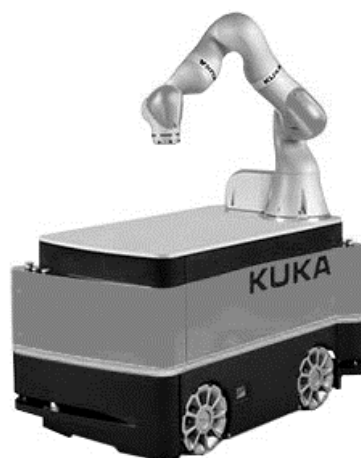


Рисунок 1.4 – Мобільний робот KUKA Mobile Robotik iiwa

У складі мобільних робототехнічних платформ також можуть бути бортові комп'ютери, в яких є ГКС. Конструктивні особливості мобільних промислових комп'ютерів полягають у наступному. Промислові мобільні комп'ютерні пристрої спроектовані так, щоб витримувати роботу в умовах відкритого простору і мати мінімальний ризик випадкової поломки. Це досягається за рахунок внесення до його конструкції істотних відмінностей. Жорсткий диск захищеного ноутбука поміщається у спеціальний контейнер із пористим наповнювачем. Така прокладка краще гасить ударні та вібраційні дії, ефективно захищаючи жорсткий диск ноутбука. Від ударів та вібрацій потрібно захищати не тільки корпус жорсткого диска, але й місця з'єднання диска із контейнером. Стандарт має на увазі жорстке з'єднання SATA- і IDE-роз'ємів, яке може зруйнуватися в процесі експлуатації під впливом вібраційних навантажень. Щоб з'єднати роз'єм жорсткого диска промислового ноутбука інтерфейсним роз'ємом на контейнері, застосовується з'єднання через гнучкий шлейф. Таке гнучке з'єднання допускає взаємні переміщення жорсткого диска та корпусу контейнера, в якому він знаходиться, без руйнування пластикових конекторів. Це рішення дозволяє жорсткому диску продовжувати виконання операцій читання та запису в момент дії ударів та вібрацій [9].

1.2.3 Інформаційно-керуючі РТС

Інформаційно-керуючі РТС можуть не мати механічно рухомих виконавчих пристроїв. Вони на підставі інформації, що надходить від зовнішніх джерел, виконують за допомогою визначених алгоритмів і програм (у тому числі адаптуються до обстановки і до поставленої задачі) обробку інформації, видачу результатів на дисплей чи інші зовнішні пристрої, а також автоматично виробляють необхідні керуючі сигнали на основі цих результатів.

Інформаційні робототехнічні системи можуть визначати властивості невідомих об'єктів у будь-якому середовищі, зокрема автоматично проводити дослідження у космічному просторі. Інформаційні роботи можуть міститися в підводних апаратах і автоматично керувати їхнім рухом у залежності від ситуації і результатів вимірів у місці їхньої дії.

До інформаційних роботів відносяться також і автоматичні контрольно-вимірювальні системи на виробництві. Справді, там затрачається багато ручної праці на контрольно-вимірювальні операції. Тут призначенням робототехніки є автоматизація самого процесу контролю, подачі деталей на контроль, проведення вимірів і потім автоматичне сортування деталей різного ступеня придатності (чи просто не придатні і браковані), а також передача до верстата інформації про необхідність підналагодження. Ця задача теж повинна бути вирішена для завершення комплексної автоматизації виробництва і ліквідації одноманітної ручної праці. В таких інформаційних роботах можуть бути присутніми деякі маніпуляційні пристрої [4].

1.3 Типи управління робототехнічними системами

Пристрої керування роботами, як правило, ділять на три типи. Вони ж, у свою чергу, діляться ще на 3 підгрупи кожна. І кожна з них має своє призначення, свої відмінності, свої достоїнства і недоліки, компромісом між якими і досягається оптимальне функціонування конкретної мехатронної системи при конкретних умовах і наявності тих чи інших фахівців і матеріальних засобів. Не можна судити про систему управління тільки за її сучасності, якості виконання, нестандартної реалізації та інших зовнішніх факторів. А в деяких випадках і зовсім немає вибору між декількома видами пристроїв управління, наприклад, якщо не дозволяють умови роботи робота розмістити поруч оператора – наприклад, в зоні, яка уражена радіацією.

За типом управління робототехнічні системи підрозділяються на:

– біотехнічні;

- автоматичні;
- інтерактивні.

Перша категорія – біотехнічні системи управління. Це такий тип роботів, в якому рух руки людини – оператора, повторюється рухом маніпулятора робота в максимальній точності. Переваги такої категорії очевидні, оскільки оператор має змогу знаходитися у віддаленому місті відносно до зони використання робота, до того ж людині може загрозувати небезпека різних рівнів складності, як низьких так і взагалі смертельних. Крім того людина може виконувати ті чи інші задачі з більшою точністю, оскільки рухи робота є стабільнішими та набагато точнішими.

Друга категорія – системи автоматичного управління (САУ). Дана категорія роботів здатна працювати без якоїсь участі оператора. Їм досить заздалегідь закласти схему поведінки, задати послідовність, задати координати. Такі роботи дуже зручні в тих випадках, коли робота постійна, циклічна і не змінюється в процесі її виконання. А також не потрібно витрачати гроші на оператора, та й швидкості автоматичні системи керування досягають більш високої, ніж інші (де бере участь людина). Не менш важливим є те, що при роботі таких роботів підвищується безпека, так як участь людини в технічному процесі або мінімально, або відсутній зовсім.

Третя категорія – це системи інтерактивного управління. Це змішаний тип в управлінні роботів, що дозволяє використовувати робота як повністю автономну, незалежну систему, але в разі необхідності людина може взяти керування роботом самостійно, також можливі варіації такої роботи по черзі. Особливістю даної категорії являється те, що людина має змогу подавати команди роботу за допомогою голосу, в текстовому виді, або ж за допомогою певного графічного інтерфейсу. До зручностей використання такого типу роботів, можна віднести те що роботи виконують завдання по черзі, і не має змогу приступити до іншої задачі, поки оператор не вкаже на її виконання [10].

1.4 Гнучкі поліімідні структури як елементи комутаційної системи

Однією з основних тенденцій розвитку техніки є перехід від традиційної апаратури до електронних засобів (ЕЗ) на гнучких основах у рамках розвитку в усьому світі напряму гнучкої гібридної електроніки. В умовах мікромініатюризації електронних виробів застосування ГКС, до яких відносяться гнучкі електронні компоненти, елементи гнучкої електроніки, друковані плати й елементи між'єднань, забезпечує низку переваг під час створення як стаціонарних, так і рухомих конструкцій.

Однією з основних тенденцій приладобудування в усьому світі є створення пристроїв, які отримали загальну назву «гнучка електроніка». Сфера майбутніх застосувань гнучкої електроніки є досить широкою й охоплює як побутову техніку, так і компоненти військової, бортової, космічної, медичної та промислової апаратури. Таким чином, заміна жорстких компонентів апаратури на гнучкі з метою підвищення їх якості, функціональних можливостей, надійності та зменшення ГМХ, трудомісткості виготовлення, вартості, а також розробка технологічної оснастки для виробництва електронних модулів, що використовує особливості гнучких структур, є актуальними на даний час.

У компонентах гнучкої гібридної електроніки використовуються плівкові діелектричні матеріали, гнучкі електронні компоненти та рухомі конструкції пристроїв мікросистемної техніки (МСТ), гнучкі та гнучко-жорсткі багат шарові друковані плати та шлейфи, які об'єднані поняттям «гнучкі структури». У цьому застосуванні вони дозволяють вирішити питання більш щільного компонування вузлів апаратури, зниження ГМХ між'єднань [11].

У якості діелектричної основи ГКС застосовуються найрізноманітніші полімерні матеріали: поліефіри, зокрема поліетилентерефталат, поліімід, фторополімерні плівки, рідинно-кристалічні полімери і навіть термопластичні плівки, такі , наприклад, як поліетилен, полівініл хлорид і ін [12].

Для ГКС більшості груп електронних пристроїв використовується поліімід [13].

Поліімід – це високотемпературний полімер. Полііміди являють собою синтетичні полімери, які містять імідні цикли [14].

Поліімід, в першу чергу, має якісні механічні, діелектричні властивості і високе значення температурного коефіцієнта лінійного розширення, що і визначає сфери його застосування. Крім того, поліімід має високу адгезію до багатьох матеріалів, високою хімічну стійкість (в тому числі до багатьох розчинників і слабких кислот), температурну стійкість (температура експлуатації від -196 до +380 °С, короткочасно до +400 °С), радіаційну стійкість (серед полімерних матеріалів поліімід має найвищу радіаційну стійкість, діелектрична проникність змінюється на 5 % – 20 % за дози опромінення 1 Мгр).

До переваг полііміда можна віднести:

- високий рівень швидкості ковзання (максимум становить 350 м/хв);
- низький показник водопоглинання, що становить всього 0,7 % за температурного режиму від 0 °С до + 120 °С;
- межа міцності на розрив, що досягає 125 МПа;
- здатність зберігати свої робочі властивості у вакуумному середовищі;
- зносостійкість і стійкість до негативних атмосферних факторів;
- стійкість до корозійних процесів;
- низьку теплопровідність;
- наявність властивостей ізолюючого матеріалу;
- простоту обробки – для додання матеріалу потрібних розмірів і форм використовуються такі процеси, як хімічні модифікації, модифікації за допомогою нанесення металізованих покриттів, травлення, свердління;
- матеріал відноситься до категорії негорючих речовин, тому він не підтримує процес горіння.

Застосування полііміду в пристроях мікросистемної техніки можна класифікувати за функціональним призначенням поліімідного шару в

конструкції виробу. Основні сфери застосування: діелектричні покриття, зміцнюючі та захисні покриття, термодетформаційні шари, формовані гнучкі плівки, що розділяють шари з електропровідними міжшаровими переходами, мембрани і вільні (окремі) плівки (одно-і багатошарові), а також несучі основи для компонентів мікроелектроніки. При цьому варто відзначити, що деякі з наведених вище функціональних особливостей цілком можуть перетинатися в рамках однієї конструкції [15].

1.5 Висновки до розділу

У даному розділі було розглянуто мобільні робототехнічні структури, визначили їх конструктивні особливості. Мобільні робототехнічні системи відрізняються наявністю рухомого шасі з автоматично керованими приводами. Вони можуть бути колісними, ходячими, колісно-ходячими і гусеничними.

Заміна жорстких компонентів апаратури на гнучкі з метою підвищення їх якості, функціональних можливостей, надійності та зменшення ГМХ, трудомісткості виготовлення, вартості, а також розробка технологічної оснастки для виробництва електронних модулів, що використовує особливості гнучких структур, є актуальними на даний час. Тому розглянуто матеріал поліімід, як елемент комутаційної системи

Поліімід має якісні механічні, діелектричні властивості і високе значення температурного коефіцієнта лінійного розширення. Крім того, поліімід має високу адгезію до багатьох матеріалів, високою хімічною стійкістю, температурну стійкістю, радіаційну стійкістю. Саме тому для подальших експериментів та вивчення були обрані гнучкі поліімідні структури.

2 ВИБІР КОНСТРУКЦІЇ ГКС

2.1 Призначення та схема досліджуваного мобільного робота

У даній кваліфікаційній роботі розглядається модернізація комутаційної системи для мобільної платформи Keyestudio 4WD BT Robot car V2.0. Мобільний робот з Bluetooth управлінням від компанії Keyestudio – це система розробки навчальних програм на базі контролера Arduino на мікроконтролері ATmega-328 у якості ядра. Він має функції відстеження лінії, запобігання зіткнення та об'їзду перешкод, ПЧ-пульта дистанційного керування, дистанційного керування Bluetooth та вимірювання та відстеження відстані до перешкоди. Також є світлодіодна матриця для відображення різних символів або емоцій робота. Також доступна візуальна система програмування.

Основні параметри мобільного робота:

- напруга живлення мотора – 6 В...9 В;
- драйвер двигуна на мікросхемі L298N;
- датчик лінії з високою чутливістю та якістю виявлення лінії;
- інфрачервоний модуль дистанційного керування;
- ультразвуковий модуль для уникнення зіткнень;
- керування платформою з мобільного телефону через Bluetooth;
- можливість живлення робота від зовнішнього джерела живлення з напругою від 7 В до 12 В.

На рисунку 2.1 представлена схема комутаційних зв'язків мобільного робота.

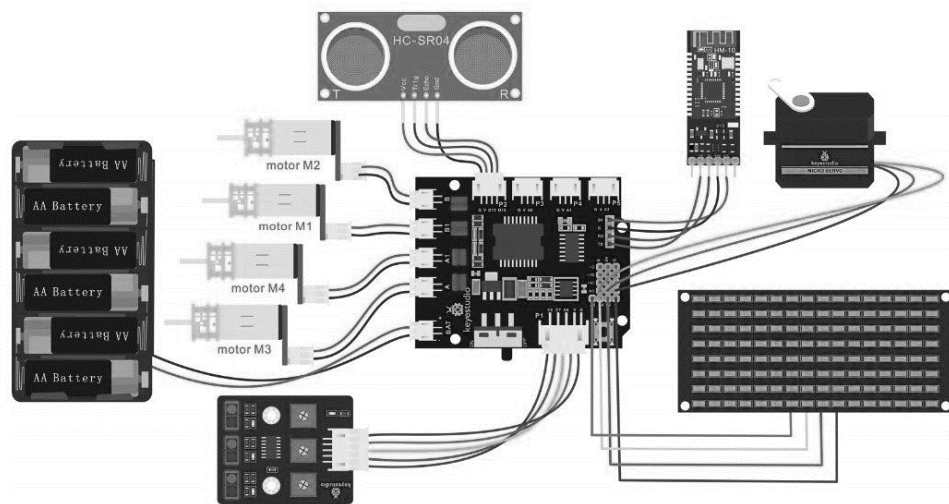


Рисунок 2.1 – Схема комутаційних зв'язків мобільного робота

Основні порушення у функціонуванні ГКС у складі такої рухомої конструкції можуть виникати через:

- неточність розрахунків характеристик виробу на етапі його проектування, неоптимальність прийнятих конструкторських рішень на етапі конструювання, порушення технології виробництва на етапі виготовлення, недотримання норм експлуатації та цілою низкою випадкових причин, які заздалегідь передбачити та оцінити неможливо;
- неоптимальний вибір принципової електричної схеми виробу з погляду виконання покладених на неї функцій, комплектуючих елементів, вихідних матеріалів, які не повною мірою враховують фізико-хімічні властивості, електричні, теплові, електромагнітні та інші режими роботи елементів плат та апаратури в цілому;
- використання незадовільних за якістю комплектуючих виробів та матеріалів, недосконалість обраних технологічних процесів та недотримання їх точного виконання, недостатню організацію та неефективність контролю якості, недосконалість технологічного обладнання, недостатній рівень автоматизації виробничих процесів, порушення санітарно-гігієнічних норм виробництва.

– використання ГКС у невідповідних технічних умов режимів експлуатації: електричних перевантажень, в умовах впливу підвищених (знижених) температур, атмосферного тиску, вібрацій, прискорень, радіації, вологості, агресивних середовищ, акустичних коливань. До експлуатаційних помилок слід також віднести природні та неминучі фактори старіння, що характеризуються дрейфом параметрів виробу електроніки та виходом їх за межі встановлених допусків, спричинені фізико-хімічною деградацією матеріалів у часі, а також зносом виробів радіоелектроніки внаслідок їх старіння [16], [17].

2.2 Вибір гнучкого шлейфу

З'єднувачі та внутрішньоблочні з'єднання на основі плоских кабелів є промисловим стандартом. Найпоширеніші – це FPC (flexible printed circuit), Micro-Match, AMP-Latch.

Плоскі кабелі діляться на два великі класи: плівкові FFC/FPC-кабелі (називаються іноді гнучкими друкованими платами) і гнучкі сигнальні шлейфи [18].

2.2.1 З'єднувачі FPC для плоских плівкових кабелів

Гнучкий плівковий кабель є одним або кількома шарами діелектрика з розташованими між ними провідниками. Такі з'єднувачі призначені для об'єднання окремих електронних вузлів та елементів у єдиний пристрій. З'єднувачі FPC легко згинаються, що дозволяє проводити монтаж у важкодоступних місцях та збільшити щільність друкованих плат.

Доступні з'єднувачі з кроком 0,25 мм, 0,3 мм, 0,5 мм, 1,0 мм та 1,25 мм. Під кроком контактів тут розуміється відстань між центрами контактів, що межують, розташованих у шаховому порядку.

За типом приєднання виконання з'єднувачів FPC ділиться на ZIF та non-ZIF. Останні розраховані на безпосередню вставку кабелю в колодку пружних

контактів з деяким зусиллям. Іноді це призводить до заломів, і застосування таких роз'ємів поступово скорочується. Їх безперечною перевагою все ще залишається низька ціна. З'єднувачі у ZIF-виконанні оснащені клямкою, яка фіксує підключений кабель у заданому положенні. Клямки бувають різних конструкцій, але завдання у них одне – максимально спростити приєднання.

FRS випускаються з верхнім та нижнім розташуванням контактів. Це зумовлено тим, що контактний майданчик на плівковому кабелі може бути як з одного, так і з іншого боку. Також пристрій з виводами у вигляді плівкового шлейфу може встановлюватись різним чином відносно роз'єму. Щоб уникнути перекручування шлейфу, пропонуються рознімання з верхнім або нижнім розташуванням контактів [18].

2.2.2 З'єднувачі Micro-Match для плоских кабелів

Micro-Match є одним з найменших з'єднувачів для плоских кабелів з кроком контактів 1,27 мм. Контакти луджені, повністю покриті металом (ніяких порожніх країв тощо), що запобігає переміщенню продуктів корозії. Головна перевага Micro-Match перед іншими видами з'єднувачів – це наявність контактної пружинної системи в розетці, яка:

- нейтралізує відносні переміщення, викликані вібрацією та тепловим розширенням між контактами вилки та розетки;
- забезпечує щільне з'єднання за будь-яких обставин, захищаючи з'єднувач від фреттинг-корозії (корозія, що виникає при мінімальному повторюваному (локальному) переміщенні двох поверхонь відносно один одного в умовах корозійного середовища);
- забезпечує захист від стирання.

З'єднувачі Micro-Match застосовуються під час виробництва автомобільних аудіо- та мультимедійних систем, систем навігації, ігрових консолей, базових станцій, телефонів, телевізійних приставок, аудіотехніки [18].

2.2.3 З'єднувачі для плоских кабелів AMP-Latch

З'єднувачі AMP-Latch оснащені контактами IDC (Insulation-Displacement Connector – контакти зі зміщенням ізоляції).

Підключення плоского кабелю відбувається у чотири етапи:

- вирівнювання дротів плоского кабелю щодо слота;
- вставка кабелю, натиск кришки (ізоляція починає зміщуватися);
- ізоляція розрізана, провідники починають деформуватися;
- кабель вставлений повністю, жили щільно затиснуті, підключення

встановлено.

Після розрізу ізоляції провідник виявляється затиснутим у вилці. На нього діє залишковий тиск контакту, зубці якого щільно затискають провідник. Таке з'єднання можна назвати без доступу повітря. Отже, не буде корозії та інших шкідливих впливів довкілля. Термін служби з'єднання значно зростає.

Корпуси вилок та розеток мають елементи конструкції, які дозволяють уникнути неправильного з'єднання [18].

У кваліфікаційній роботі використовуємо XF2M – серію роз'ємів виробництва OMRON для FPC-шлейфу з кроком 0,5 мм.

Роз'єми для гнучких шлейфів серії XF2M компанії Omron (рис. 2.2) є у варіантах 10...60 контактів з кроком 0,5 мм. Роз'єми даної серії відрізняються двостороннім розташуванням контактів, що дозволяє з'єднувати прямим шлейфом (без перекручування) вузли, розташовані на верхньому та нижньому шарах друкованої плати.

FPC-конектори XF2M мають задню рухливу клямку, яка забезпечує більш високу надійність та ефективність у порівнянні з іншими роз'ємами, у яких блоктор розташований спереду з боку введення шлейфу. Цим забезпечується більша зручність монтажу/демонтажу шлейфу, а також знижується ризик його пошкодження при маніпуляціях із клямкою. Навіть за наявності відкритого роз'єму контакт зі шлейфом зберігається. Конструкція роз'єму виключає бічні усунення шлейфу.

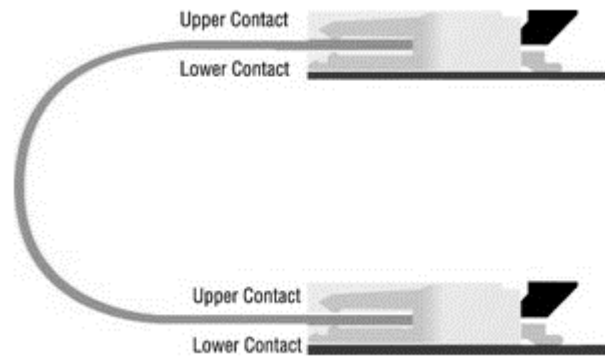


Рисунок 2.2 – Комутація за допомогою з'єднувача FPC-шлейфу

Конструкція, призначена для поверхневого монтажу (SMT), а також малі габарити (ширина та висота не перевищують 5,9 мм та 2 мм, відповідно) призводять до суттєвої економії площі друкованої плати та дозволяють використовувати роз'єми XF2M у найменших додатках.

Загалом роз'єми Omron для гнучких шлейфів відрізняють компактні розміри (особливо висота як у зафіксованому стані шлейфу, так і у вільному), ці виробники допускають до декількох десятків підключень/відключень шлейфу (для більшості додатків це більш ніж достатньо). Також роз'єми забезпечують надійну фіксацію шлейфу та контактний опір менше 100 мОм (типове значення <80 мОм). Від окислення контакти роз'ємів захищає шар золота товщиною близько 0,12 мкм...0,15 мкм поверх нікелевого покриття 2 мкм [19].

2.3 Вибір комутаційних зв'язків для моделювання

Для моделювання потрібно визначитися з вузлом комутаційних зв'язків. Проаналізувавши рисунок 3.1 визначили, що потребується модернізація вузла комутаційних зв'язків, який зображено на рисунку 2.3.

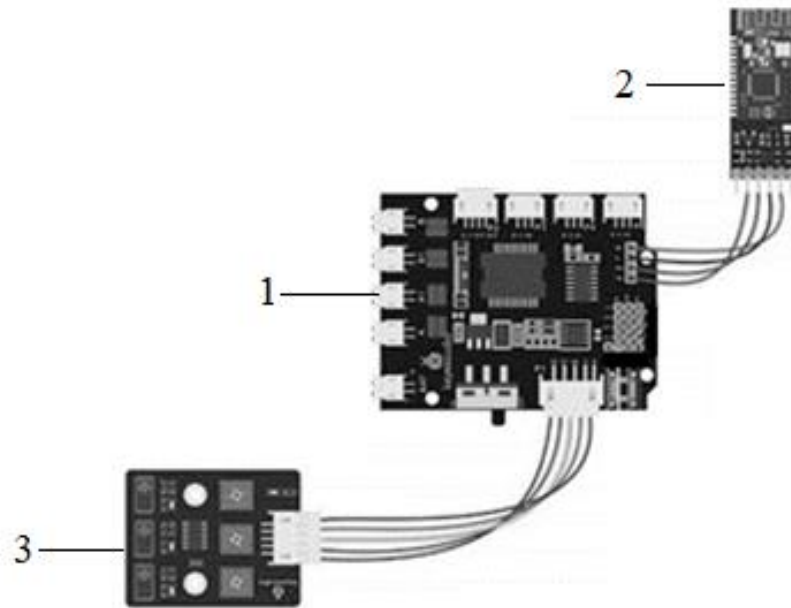


Рисунок 2.3 – Вузол комутаційних зв’язків мобільного робота Keyestudio 4WD BT Robot car V2.0: 1) модуль Keyestudio Motor Driver Shield; 2) модуль Keyestudio HM-10 Bluetooth-4.0; 3) модуль Keyestudio Line Tracking Sensor

2.4 Висновки до розділу

З розглянутих мобільних робототехнічних платформ, було вибрано мобільну платформу Keyestudio 4WD BT Robot car V2.0. Досліджуваний мобільний робот – це система розробки навчальних програм на базі контролера Arduino на мікроконтролері ATmega-328 у якості ядра. Він має функції відстеження лінії, запобігання зіткнення та об’їзду перешкод, ПЧ-пульта дистанційного керування, дистанційного керування Bluetooth та вимірювання та відстеження відстані до перешкоди.

Проаналізувавши гнучкі шлейфи, вибрали FPC-шлейф для плоских плівкових кабелів. Такі з’єднувачі призначені для об’єднання окремих електронних вузлів та елементів у єдиний пристрій. З’єднувачі FPC легко згинаються, що дозволяє проводити монтаж у важкодоступних місцях та збільшити щільність друкованих плат.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІЖЕННЯ

3.1 Вибір засобу та методу моделювання

Для того, щоб виконати моделювання комутаційної системи, треба звернутися до систем автоматизованого проектування та моделювання. На даний момент існує декілька інструментів для моделювання. Серед найбільших відомих та таких, що підходять для вирішення нашої задачі, можна виділити засоби: Comsol Multiphysics та ANSYS.

COMSOL Multiphysics – це програмне забезпечення для аналізу методом скінченних елементів, розв’язування й імітації для різноманітних фізичних та інженерних додатків, особливо для спарених явищ чи мультифізики. Цей пакет є кросплатформним (Windows, Mac, Linux).

Основним продуктом є COMSOL Desktop, який є інтегрованим середовищем, розробленим для міждисциплінарної розробки продукції з об’єднаним робочим процесом для електричних, механічних, рідинних і хімічних додатків. Додаткові модулі є вбудованими в COMSOL Desktop, також проведення операцій програмного забезпечення залишається однаковим, незалежно від того, які додаткові продукти застосовуються.

Модуль Application Builder також доступний у середовищі COMSOL Desktop і дозволяє створювати спеціалізовані додатки, що базуються на фізичних моделях з користувацьким інтерфейсом, що дозволяє уникати деталей імітаційної моделі з точки зору кінцевого користувача. Доступні два редактори для створення додатків: використовуючи перетягування (drag-and-drop) у редакторі форми та програмуючи в редакторі методу. Також наявна можливість додавати деталі з моделі або задавати їх програмно з редактора методу.

COMSOL Multiphysics також надає прикладний програмний інтерфейс (API). API для використання з мовою Java вбудований у COMSOL

Multiphysics і надає програмне рішення запуску програмного забезпечення, компілюючи об'єктно-орієнтований код. Цей інтерфейс також використовується в редакторі методу в конструкторі додатків. Також наявна можливість працювати з COMSOL Multiphysics у зв'язці з MATLAB.

Інтерфейс програми зображено на рисунку 3.1.

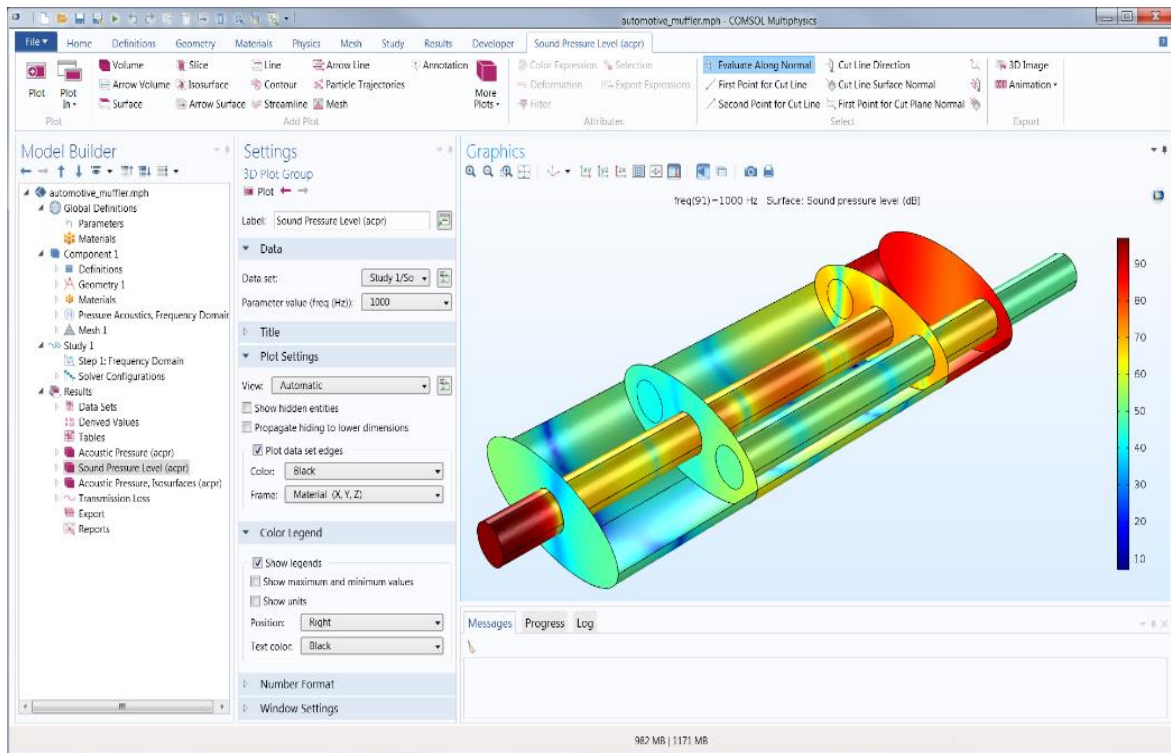


Рисунок 3.1 – Інтерфейс програми COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics дозволяє моделювати в єдиному програмному середовищі електродинамічні й оптичні процеси, вирішувати завдання механіки конструкцій, акустики, гідродинаміки, теплопередачі, хімії та електрохімії, а також досліджувати будь-які інші фізичні явища, які можна описати системами диференціальних рівнянь у часткових похідних.

В одній розрахунковій моделі можна скомбінувати рівняння, що описують ці фізичні явища. Для побудови розрахункових моделей використовується графічна оболонка COMSOL Desktop у режимі Model Builder, яка містить повний набір інструментів, це забезпечує логічне та

послідовне виконання всіх етапів моделювання, незалежно від типу завдання, що вирішується [20].

Переваги: простий інтерфейс користувача, наявність великої кількості інструментів. COMSOL Multiphysics забезпечує можливість експорту скінчено-елементної моделі до Simulink пакету MATLAB. Це дозволяє моделювати роботу об'єкта управління разом із перетворювачами електричної енергії, системами управління; досліджувати частотні характеристики та стійкість електротехнічного комплексу. Завдяки освітній програмі та популярності знайома студентам та інженерам. Найбільш точно відповідає вимогам теми та технічного завдання цієї кваліфікаційної роботи.

Недоліки: висока вартість, відсутність літератури українською мовою.

ANSYS – це програмний пакет скінченно-елементного аналізу, що вирішує завдання у різних галузях інженерної діяльності (міцність конструкцій, термодинаміка, механіка рідин і газів, електромагнетизм), включаючи пов'язані багатодисциплінарні завдання (термоміцність, магнітопружність тощо).

ANSYS – це професійний кінцево-елементний розрахунковий комплекс, що дозволяє вирішувати завдання міцності, теплообміну, електромагнетизму, гідрогазодинаміки як окремо, так і спільно, у пов'язаній постановці.

Система ANSYS – це гнучкий та надійний засіб проектування й аналізу. Вона працює серед операційних систем найпоширеніших комп'ютерів – від PC до робочих станцій, високопродуктивних кластерів і суперкомп'ютерів. Особливістю програмної системи є файлова сумісність всіх членів сімейства ANSYS для всіх платформ.

Багатоцільова спрямованість програми (тобто реалізація в ній засобів для опису відгуку або реакції складної системи на впливи різної фізичної природи) дозволяє використовувати ту саму модель для вирішення таких пов'язаних завдань, як міцність за умови теплових навантажень, вплив магнітних полів на міцність конструкції. Це забезпечує всім користувачам ANSYS зручні можливості для вирішення широкого кола інженерних завдань.

Як новачкам, так і досвідченим користувачам ця програма пропонує перелік різноманітних функцій, які безперервно зростають і дозволяють:

- врахувати різноманітні конструктивні нелінійності;
- вирішити найзагальніший випадок контактної взаємодії для просторових тіл складної конфігурації;
- враховувати наявність великих (кінцевих) деформацій, переміщень і кутів повороту;
- виконати багатопараметричну оптимізацію в інтерактивному режимі;
- аналізувати вплив електромагнітних полів;
- вирішувати задачі гідро- та аеродинаміки,
- а також багато іншого – разом із параметричним моделюванням, адаптивною перебудовою сітки, використанням р-елементів і великими можливостями створення макрокоманд за допомогою мови параметричного проектування системи ANSYS – APDL.

Моделювання впливів на досліджувані об'єкти за різними критеріями проводиться у відповідних пакетах програми. Mechanical – міцність і тепловий стан, Structural – тільки лінійний і нелінійний механічний вплив, Professional – вирішення лінійних завдань з механічного впливу з урахуванням тепла, EMAG – аналіз електромагнетизму, Flotran – гідро- та газодинаміка [21].

Інтерфейс програми зображено на рисунку 3.2.

Переваги: велика швидкість обробки інформації, великий спектр отриманої інформації, яка ілюструється декількома способами, наявність навчальних матеріалів українською мовою, широкі можливості використання, а також більш точні розрахунки. Має велику бібліотеку кінцевих елементів.

Недоліки: висока вартість, складність у освоєнні.

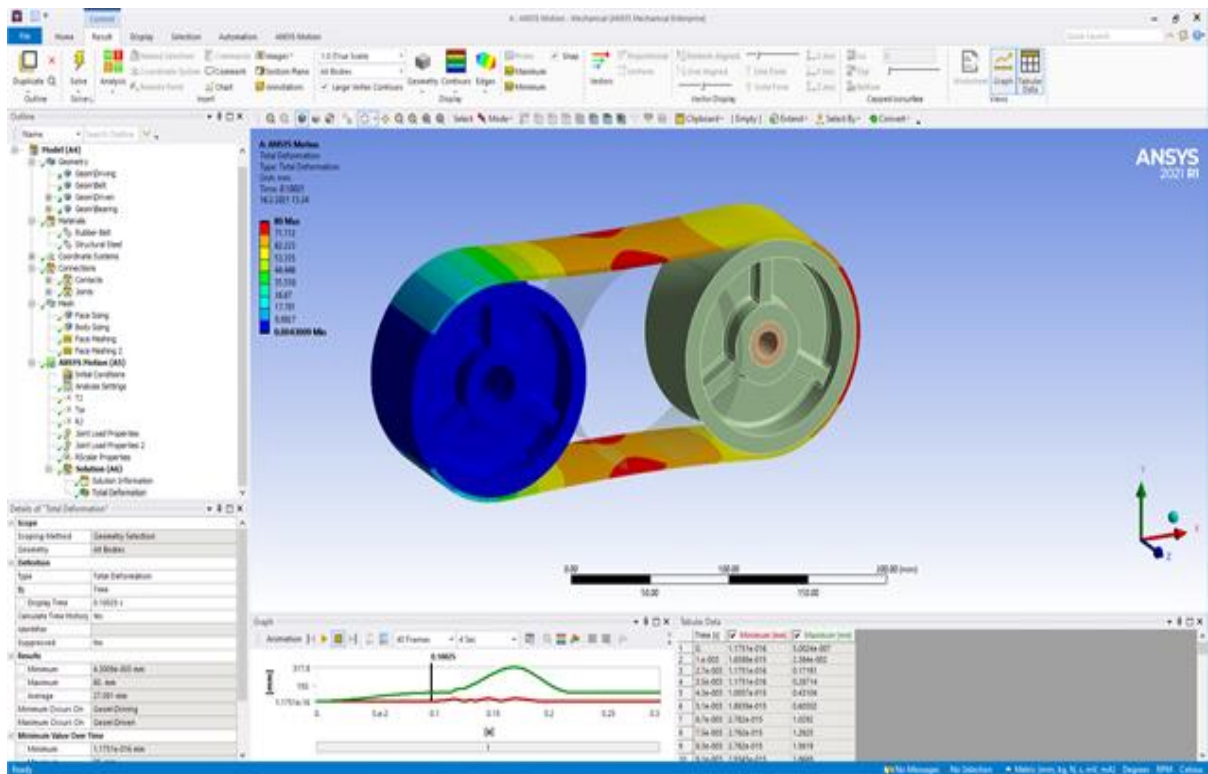


Рисунок 3.2 – Інтерфейс програми ANSYS

SolidWorks – продукт компанії SolidWorks Corporation (зараз – дочірня компанія Dassault Systemes), САПР, інженерного аналізу та підготовки виробництва будь-якої складності та призначення.

SolidWorks є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу згідно з концепцією CALS-технологій, включаючи двонаправлений обмін даними з іншими Windows-застосунками та створення інтерактивної документації.

У залежності від класу задач, що розв’язуються, замовникам пропонується три базових конфігурації системи: SolidWorks, SolidWorks Professional та SolidWorks Premium.

Завдання, які вирішуються:

- 3D-проекування виробів (деталей і складальних одиниць) будь-якого ступеня складності з урахуванням специфіки виготовлення;
- створення конструкторської документації;
- промисловий дизайн;

- інженерний аналіз (міцність, стійкість, теплопередача, частотний аналіз, динаміка механізмів, газо/гідродинаміка, оптика та світлотехніка, електромагнітні розрахунки, аналіз розмірних ланцюгів і ін.);
- експрес-аналіз технологічності на етапі проектування;
- технологічна підготовка виробництва;
- проектування оснащення й інших засобів технологічного оснащення;
- аналіз технологічності конструкції виробу;
- розробка технологічних процесів;
- механообробка: розробка керуючих програм для верстатів з ЧПК, верифікація КУ (керуючих програм), імітація роботи верстата. Фрезерна, токарна, токарно-фрезерна й електроерозійна обробка, лазерне, плазмове та гідроабразивне різання, вирубні штампи, координатно-вимірювальні машини;
- управління даними та процесами на етапі технологічної підготовки виробництва (ТПП);
- ведення архіву технічної документації;
- проектне управління;
- захист даних.

Середовище проектування SolidWorks відносно просте у використанні та має зрозумілий інтерфейс користувача (рис. 3.3) [22].

Переваги: простий інтерфейс користувача, наявність великої кількості інструментів. Можливість встановити пакет програм для виконання декількох задач, окрім проектування. Не займає багато пам'яті за відсутності складних випробувань та не потребує великих витрат часу та сил на видалення.

Недоліки: дорого коштує, погана реалізація оновлень.

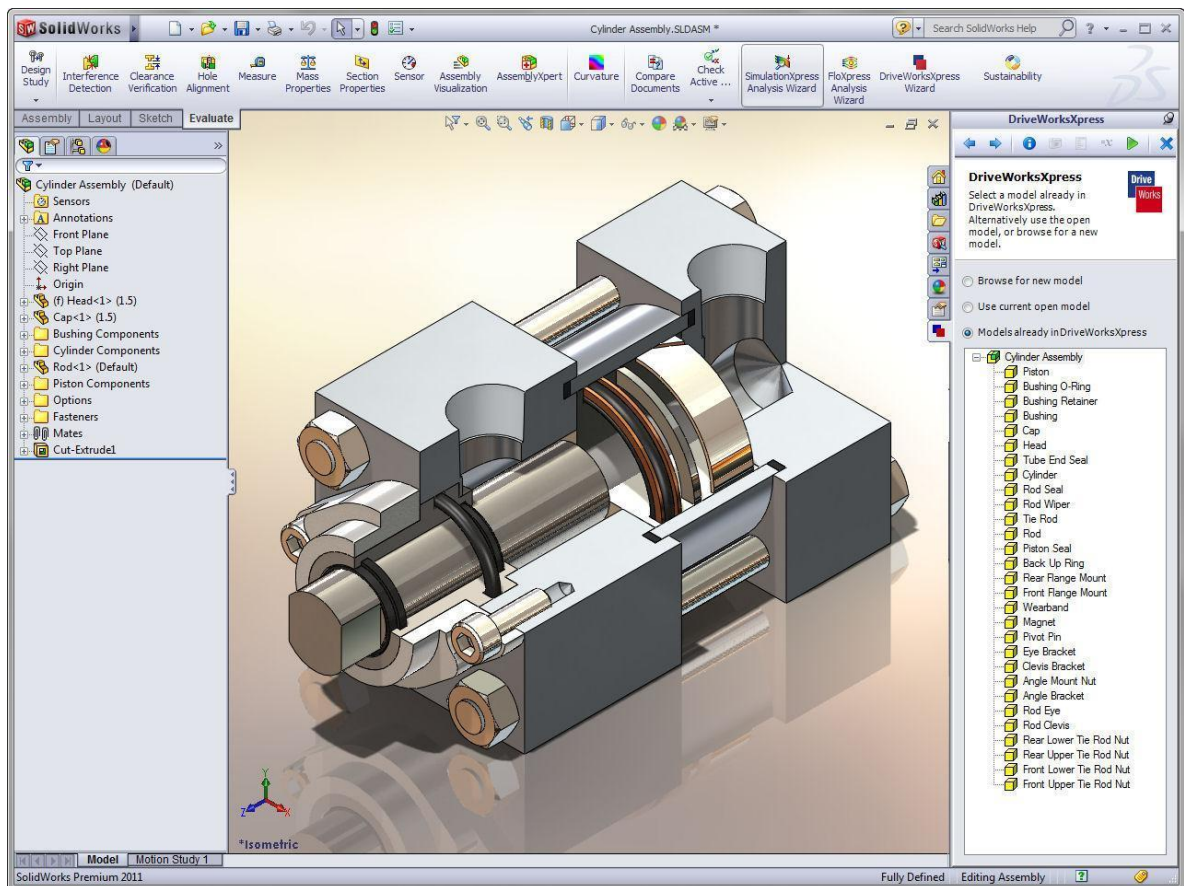


Рисунок 3.3 – Інтерфейс користувача SolidWorks

Проаналізувавши функціональність вищеписаних програмних продуктів для моделювання, можна зробити висновок, що програмний продукт COMSOL Multiphysics є найбільш оптимальним і задовольняє всім заданим вимогам, а саме:

- наявність зручного інтерфейсу;
- можливість експорту скінченно-елементної моделі до Simulink пакету MATLAB;
- наявність різноманітних математичних моделей фізичної поведінки матеріалів;
- наявність великої бібліотеки кінцевих елементів;
- вивід результатів в легкому для розуміння відображені за допомогою кольору.

3.2 Розробка імітаційної моделі комутаційної системи мобільної робототехнічної платформи

Для реалізації дослідження було прийнято рішення розробляти імітаційну модель вузла комутаційних зв'язків мобільного робота Keyestudio.

На початковому етапі створення моделі у COMSOL Multiphysics 5.6 обираємо режим «Model Wizard», а в ньому просторовий вимір – 3D. У ньому вибираємо дослідження моделі «Study» та «Stationary».

Цей режим моделювання призначений для випадків, коли параметри моделі є статичними та не змінюються протягом часу. Робоче вікно цього режиму приведено на рис. 3.4.

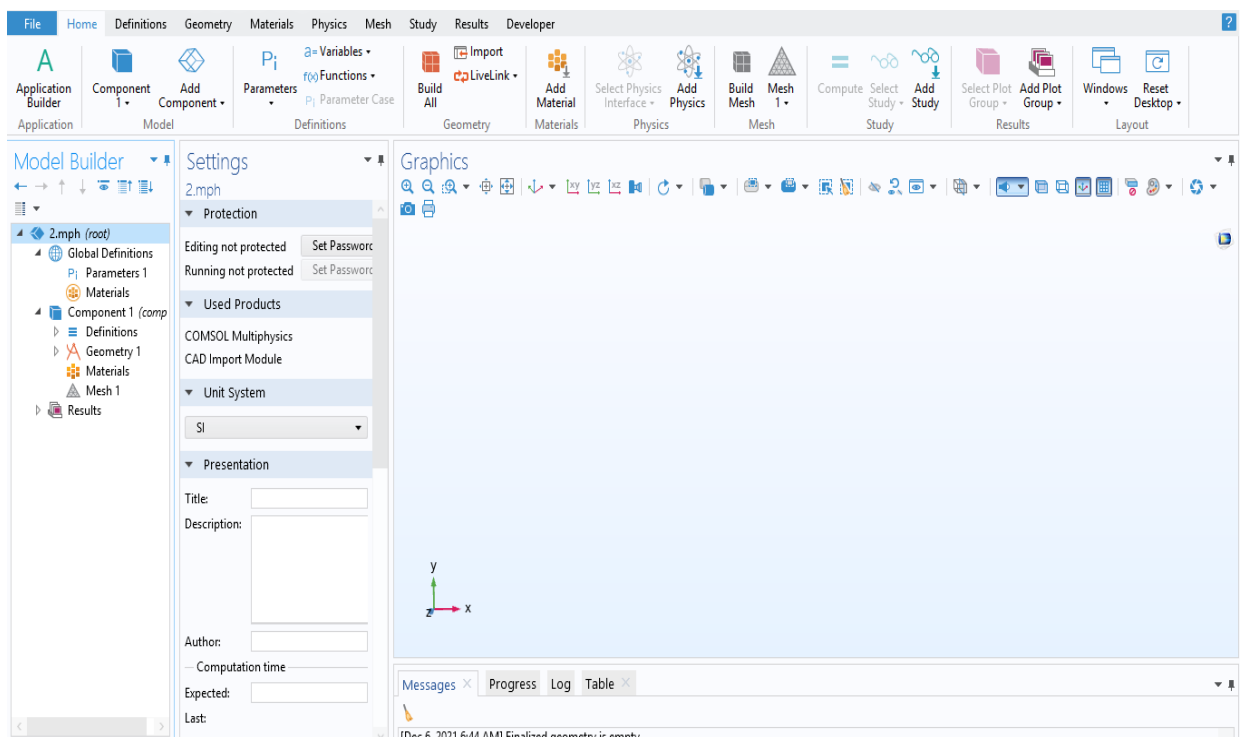
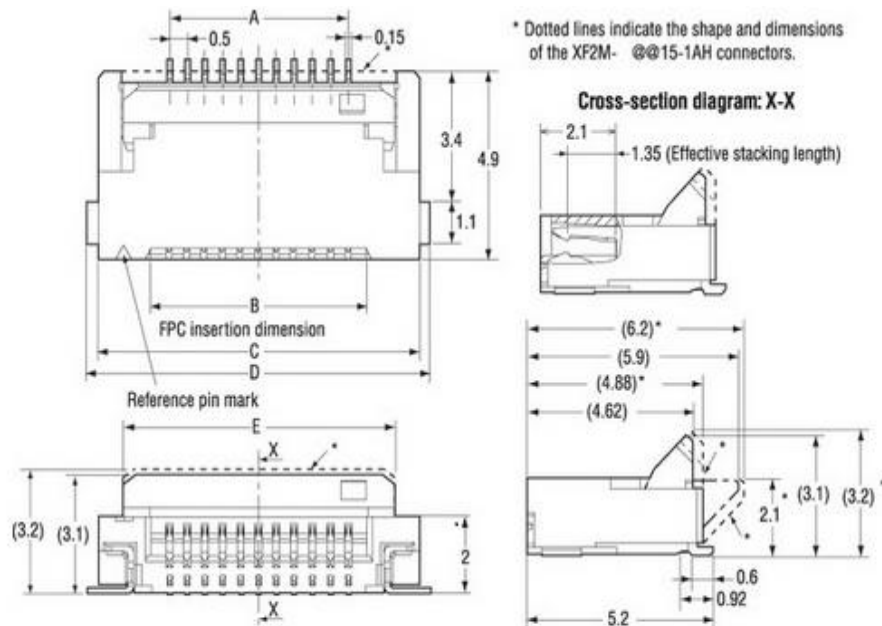
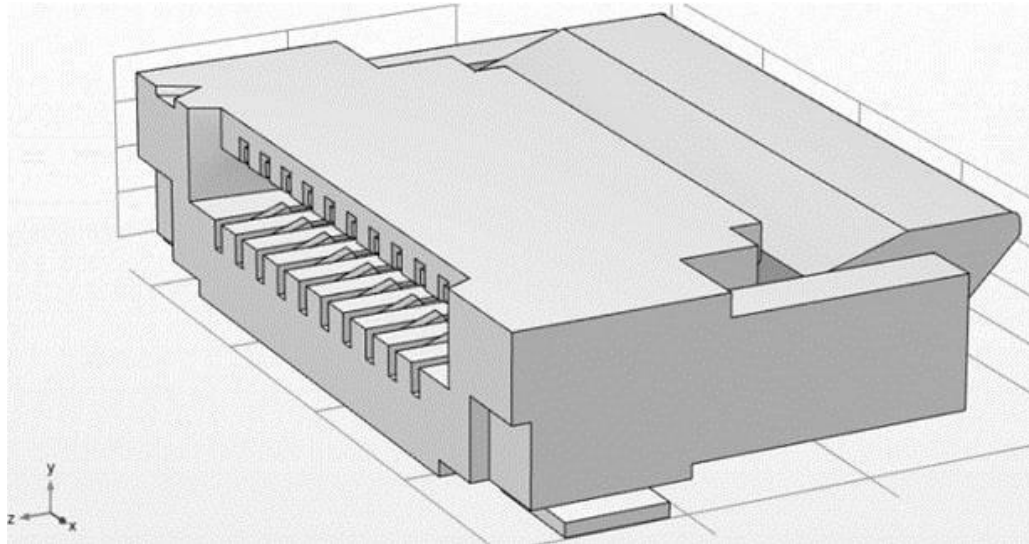


Рисунок 3.4 – Робоче вікно режиму «Model Wizard»

Наступний етап дослідження – це побудова 3D-моделі, який поділяється на три пункти:

- побудова з'єднувача XF2M;
- побудова FPC-шлейфу;
- розміщення побудованих елементів у робочому просторі.

Величини, які зображені на рис. 3.5 та 3.6, а саме А, В, С, D, Е, можуть збільшуватись або зменшуватись у залежності від кількості виводів. А саме, у нашому випадку, кількість виводів дорівнює 10, А = 4,5 мм, В = 5,6 мм, С = 8,5 мм, D = 9,1 мм, Е = 7,1 мм.



Наименование	Количество выводов	Размер, мм				
		A	B	C	D	E
XF2M-1015-1A	10	4,5	5,6	8,5	9,1	7,1

Рисунок 3.5 – Побудова FPC-з'єднувача, який виконано згідно розмірів з DataSheet елементу [23]

На рисунку 3.7 показано загальний вигляд комутаційної системи.

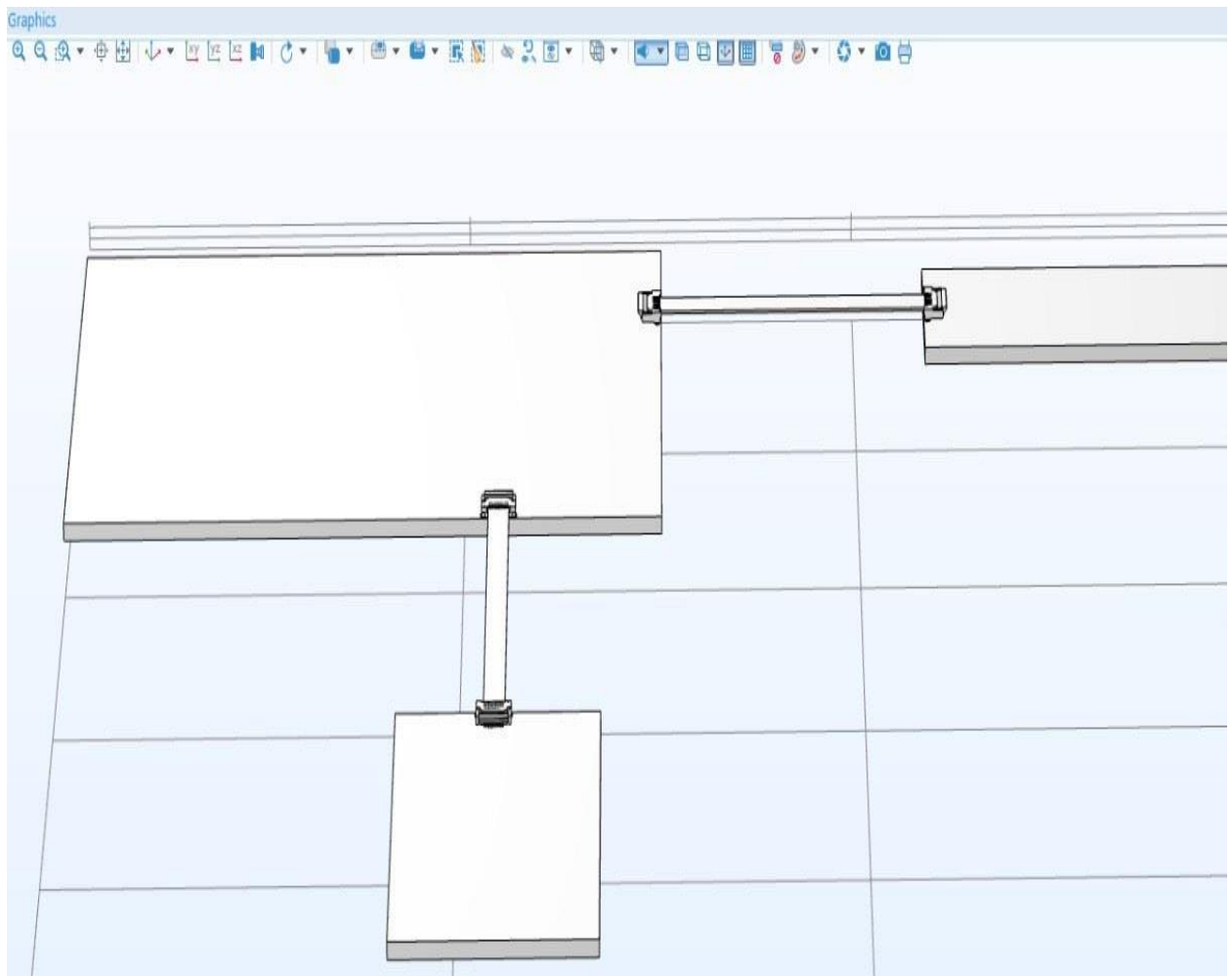


Рисунок 3.7 – Загальний вигляд комутаційної системи [25]

Наступним кроком для здійснення моделювання є задання матеріалів шлейфу та з'єднувача.

Для шлейфу ми використовуємо матеріал полімід марки ПМ-А товщиною від 100 мкм для застосування як самостійного електроізоляційного матеріалу, що використовується для виготовлення гнучких фольгованих діелектриків, друкованих схем, у конденсаторах та інших виробках, що експлуатуються за температур від $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Матеріалу притаманні хороші фізичні характеристики, є збереження еластичності у широкому діапазоні температур. Основа маслостійка, не розчиняється в органічних розчинниках, помірно стійка до кислот і лугів, має високу радіаційну стійкість (рис. 3.8) [24].

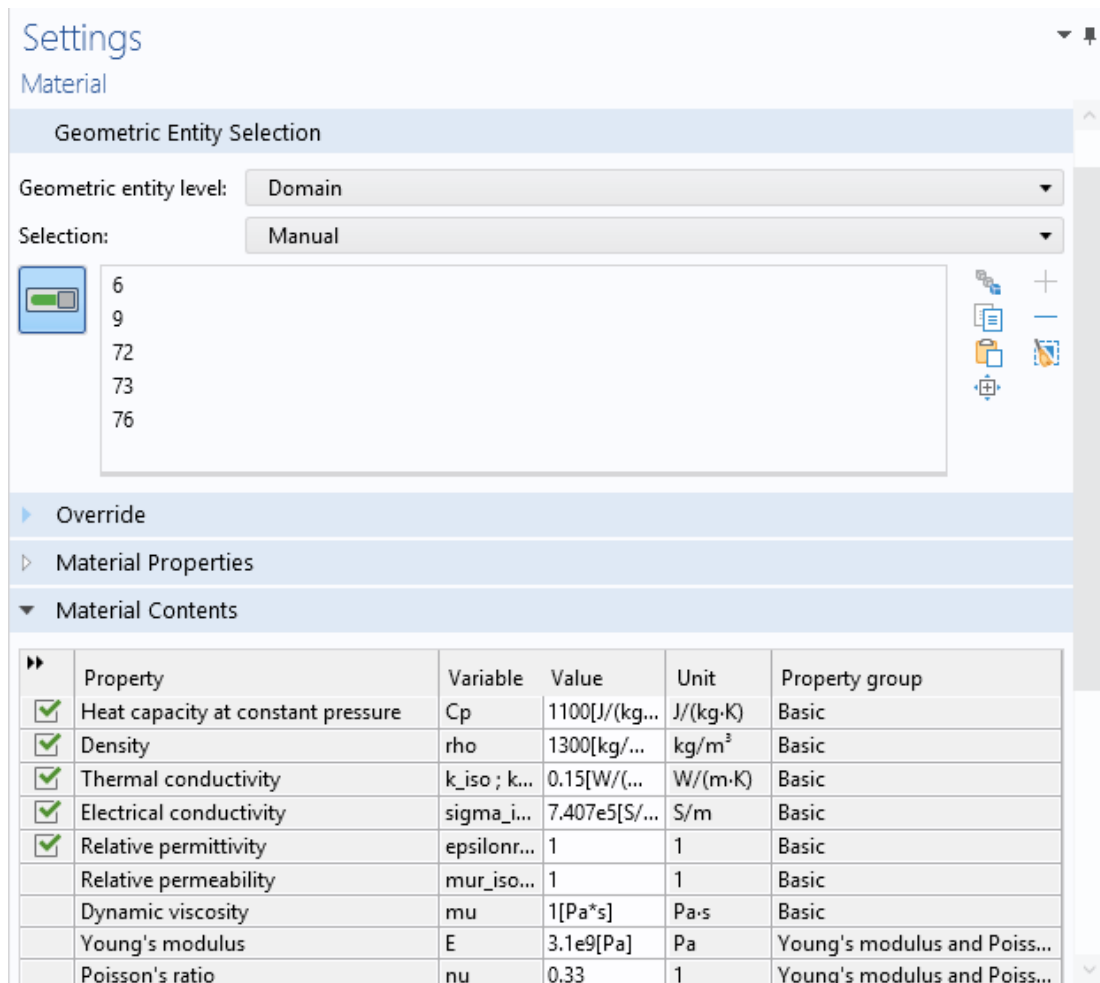
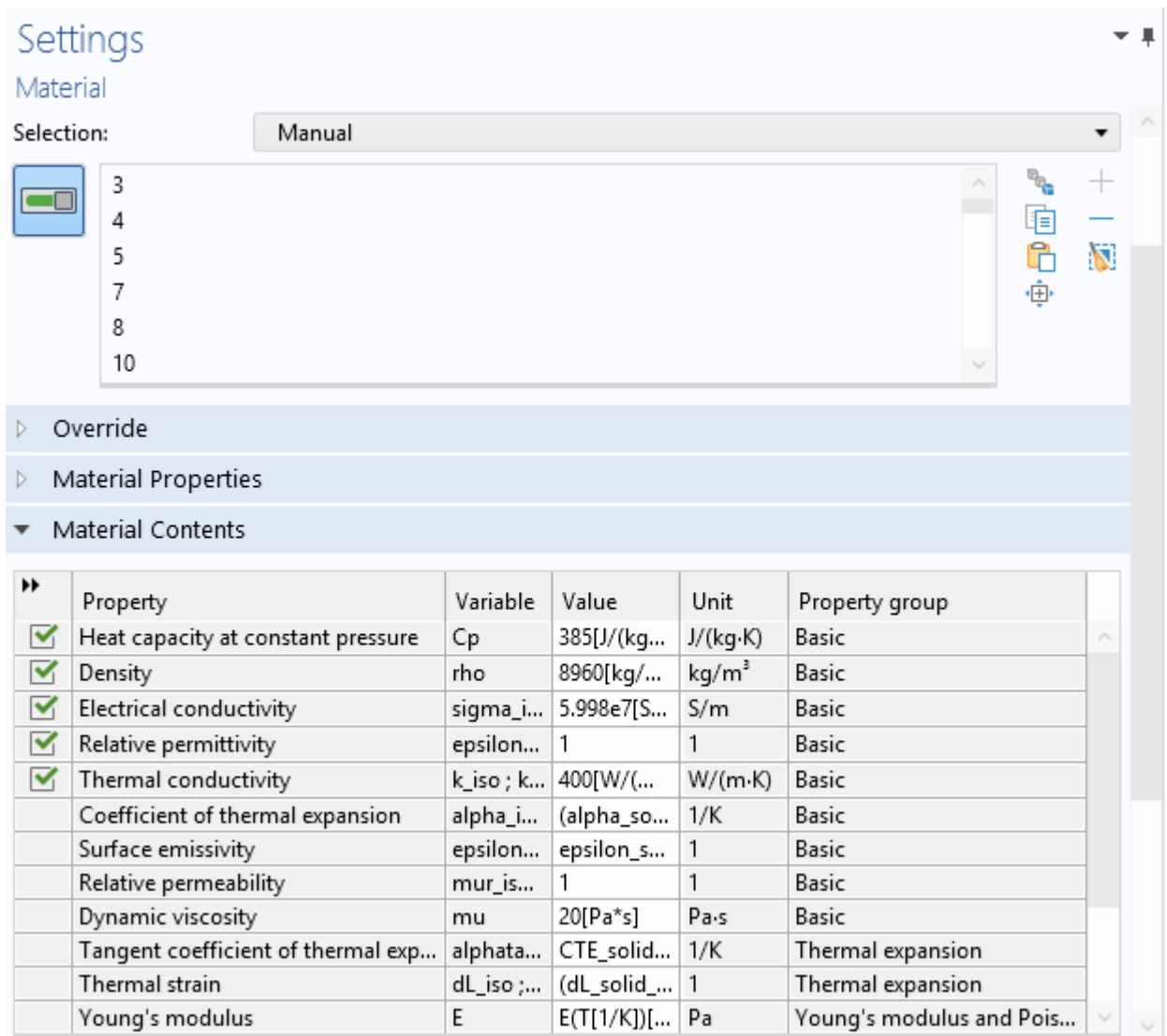


Рисунок 3.8 – Вибрана марка поліміду для шлейфа

Досліджуваний гнучкий шлейф є системою мідних провідників, сформованих на гнучкій діелектричній плівці. Тому для FPC-з'єднувача було вибрано матеріал мідь (рис. 3.9).

Наступний крок – це виконання вузла Mesh (сітка). Побудова сітки – важливий етап у процесі моделювання, оскільки він безпосередньо визначає витрати обчислювальних ресурсів під час розрахунку. Більше того, створення сітки – один з найбільш ресурсоємних етапів під час налаштування та розрахунку моделі методом скінченних елементів.



Settings
Material
Selection: Manual

3
4
5
7
8
10

Override
Material Properties
Material Contents

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	385[J/(kg...	J/(kg·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	8960[kg/...	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma_i...	5.998e7[S...	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilon...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso ; k...	400[W/(...	W/(m·K)	Basic
Coefficient of thermal expansion	alpha_i...	(alpha_so...	1/K	Basic
Surface emissivity	epsilon...	epsilon_s...	1	Basic
Relative permeability	mu_r_is...	1	1	Basic
Dynamic viscosity	mu	20[Pa*s]	Pa·s	Basic
Tangent coefficient of thermal exp...	alphata...	CTE_solid...	1/K	Thermal expansion
Thermal strain	dL_iso ; ...	(dL_solid_...	1	Thermal expansion
Young's modulus	E	E(T[1/K])[...	Pa	Young's modulus and Pois...

Рисунок 3.9 – Характеристики міді для FPC-з'єднувача

Кожна операція виконується послідовно згідно з порядком, заданим у сітковій послідовності у вузлі Mesh (Сітка). Її налаштування допомагає зменшити витрати на обчислювальні ресурси шляхом зміни числа, типу та розміру скінчених елементів. Ефективність і точність моделювання при цьому зберігається.

Для створення моделі COMSOL Multiphysics як сітка за замовчуванням використовується параметр Physics-controlled mesh (сітка, що визначається фізикою) з нормальним (Normal) розміром елемента. Як відправна точка для налаштування окремих параметрів може використовуватися цей набір готових параметрів.

У COMSOL Multiphysics існує спосіб вирішення з адаптивною сіткою. Після попереднього розрахунку на вихідній сітці система залежно від локального градієнта шуканої функції перебудовує сітку – у місцях з великими градієнтами сітка зменшується, а з малими – відповідно укрупнюється. Поставлене завдання вирішується цим методом.

У вікні Mesh → Free Mesh Parameters слід вибрати режим Extra fine (дуже щільна) та натиснути кнопку Remesh (рис. 3.10).

Правильний вибір виду розрахункової сітки скінченних елементів є визначальним моментом у вирішенні задач.

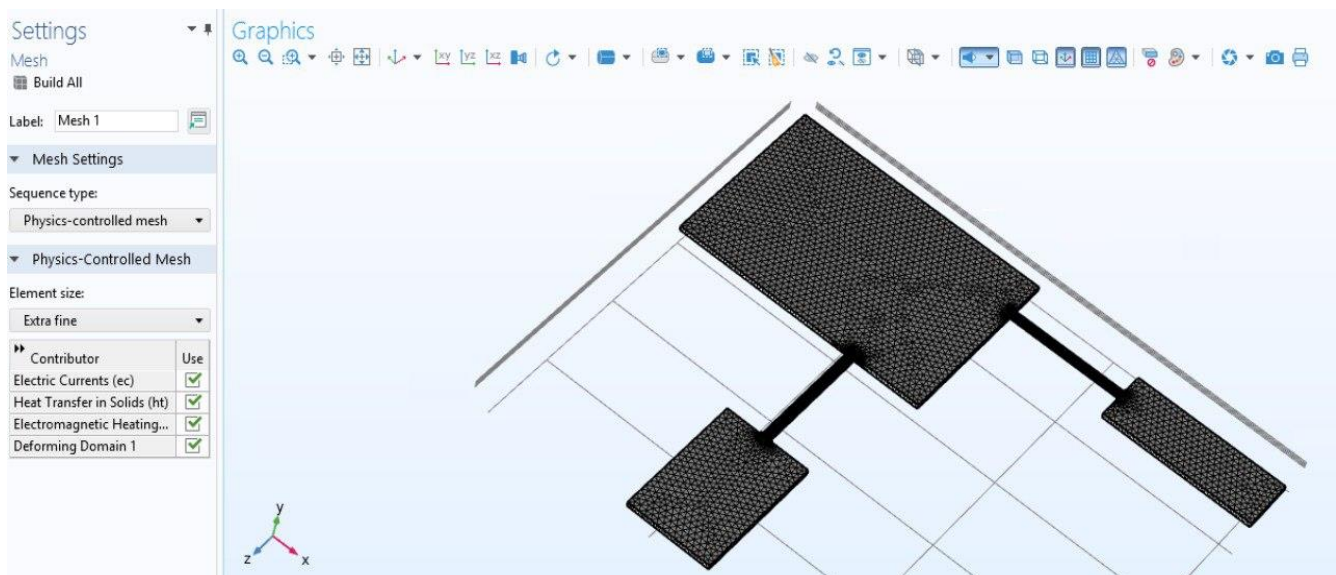


Рисунок 3.10 – Виконання вузла Mesh

3.3 Дослідження показника електричного струму та розрахунок електричних полів на провідних та діелектричних оболонках

У COMSOL Multiphysics для дослідження електричного струму та електричних полів на провідних та діелектричних оболонках потрібно використовувати інтерфейси групи Electric Currents, розширені версії яких входять до складу модулів AC/DC.

Модуль AC/DC пакету COMSOL Multiphysics дозволяє створювати моделі електростатичних систем з різними комбінаціями одновимірних дротів,

двовимірних оболонок і тривимірних тіл. Це можливо завдяки технології на основі методу граничних елементів (МГЕ). МГЕ можна використовувати як самостійну методику рішення або в комбінації з методом скінченних елементів (МСЕ).

У вікні Model Builder під Results вибираємо вкладку Electric Potential (електрична напруга).

Електрична напруга – фізична величина, яка дорівнює роботі електричного поля щодо переміщення одиничного заряду з однієї точки до іншої.

Як потенціал (Electric Potential) на поверхні заземлювача може бути задана будь-яка постійна, однак зручніше вибрати значення потенціалу, що дорівнює 1.

Результат закону збереження струму наведено на рисунку 3.7.

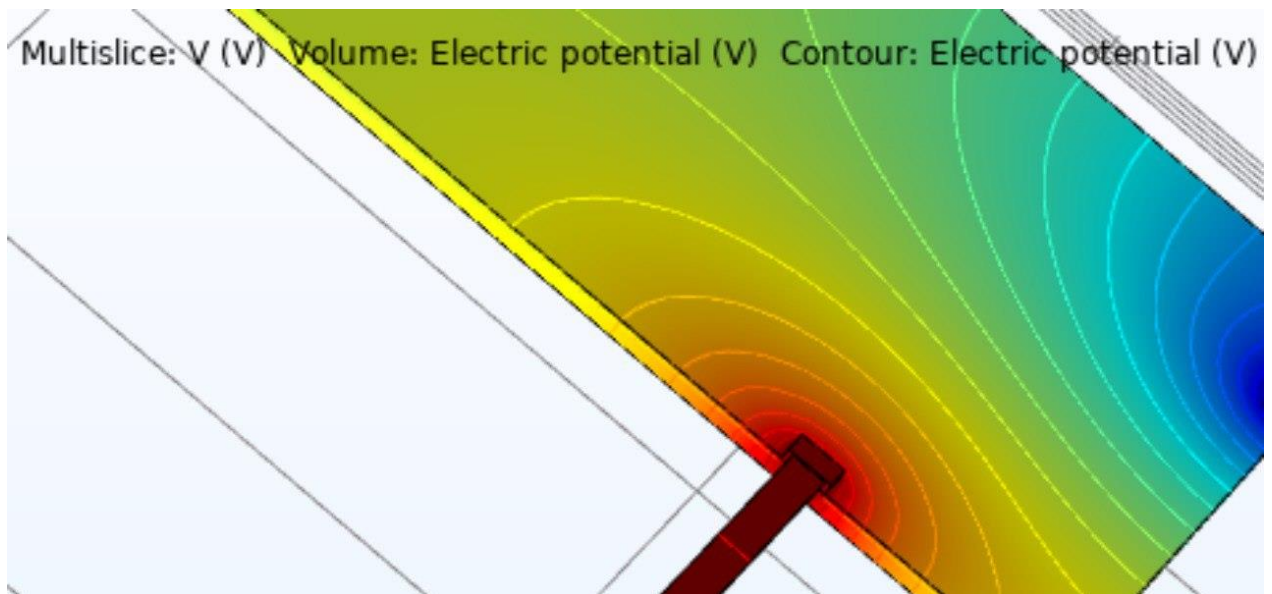


Рисунок 3.7 – Закон збереження струму стосовно потоку V

У даному дослідженні задається напруга 5 В та 20 мА постійного струму, далі задається рух напруги від з'єднувача XF2M по гнучкому шлейфу до другого з'єднувача XF2M, тобто як бачимо, як йде розподіл електричного струму: червоний колір відповідає високому позитивному розподілу струму, синій колір – високому негативному розподілу струму.

Далі досліджуємо розподіл температури під з'єднувачем.

Вибираємо вузол Temperature (ht) 1 (графік із розподілом температури) у розділі Results (Результати) моделі дерева.

У вузлі Temperature (ht) вибираємо на вузлі Isosurface (розподіл по ізоповерхні).

Результат моделювання можна бачити на рисунку 3.8.

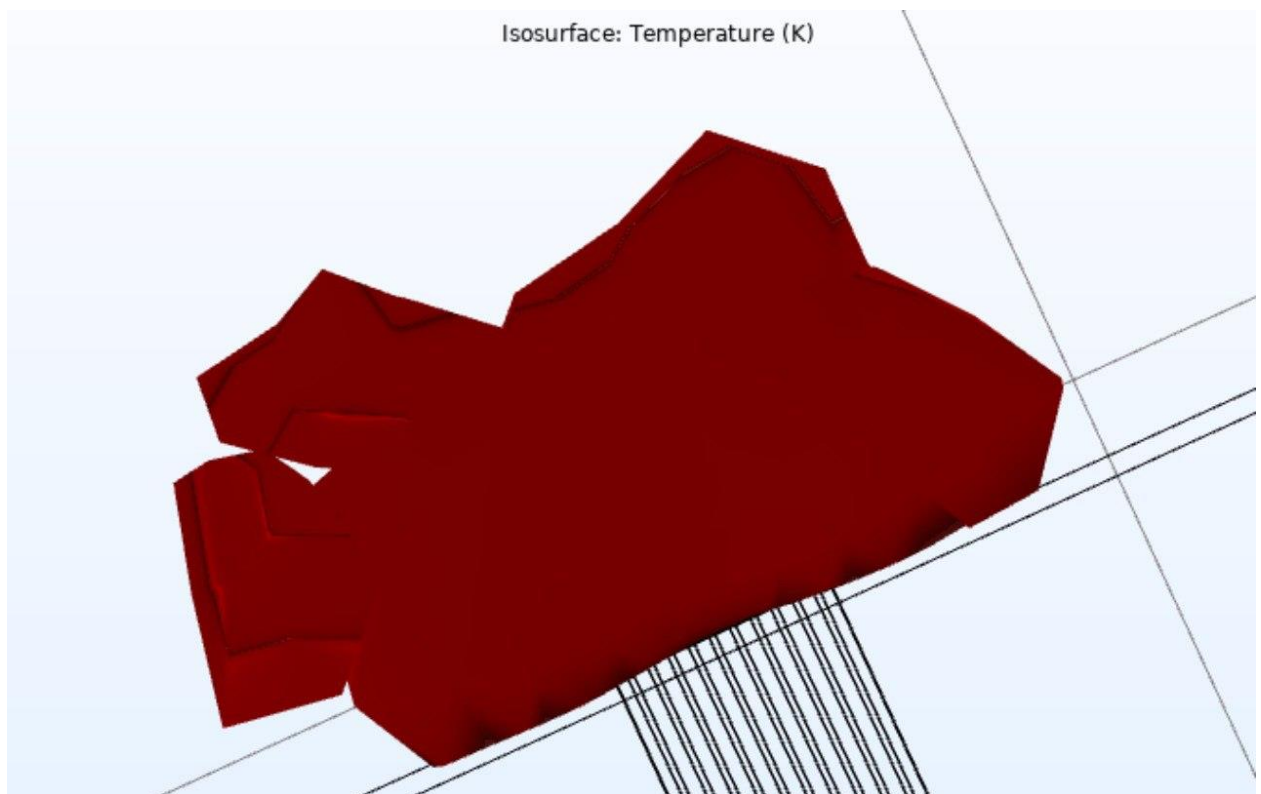


Рисунок 3.8 – Розсіювання тепла, що виділяється під FPC-з'єднувачем

Як можна бачити, розсіювання тепла, що виділяється під FPC-з'єднувачем, відбулося. Це дослідження потрібно для того, щоб побачити, наскільки теплонавантажений контакт. Як бачимо на рис. 3.8, маленька площа розсіювання.

Початковий температурний режим був приблизно 20 °C (кімнатна температура) або 293,15 K.

За результатом отримали трішки вищу температуру +23 °C та бачимо, площа розсіювання тепла маленька.

3.4 Дослідження опору контактів

Ряд специфічних явищ на межі контакту двох провідників спостерігається за однакової хімічної природи матеріалів провідників. До таких явищ відносяться наявність перехідного опору, виділення Джоулевого тепла, ерозія (поступова руйнація) контактуючих поверхонь та ін. Значення механізмів цих явищ дуже важливе для розробки комутаційної апаратури, яка використовується практично у всіх галузях техніки, науки та в побуті.

Електричний контакт є дотиком поверхонь двох однакових чи різнорідних провідників. Фактична геометрія межі розділу є дуже складною, оскільки навіть за «ідеальної» механічної обробки на поверхні металу завжди є «макронерівності» (виступи та западини) та «мікронерівності», обумовлені дефектами кристалічної структури. Крім того, на межах металів, що мають значну хімічну активність (крім небагатьох «шляхетних» металів типу срібла та золота), практично завжди є плівки оксидів, сульфатів та інших сполук, які розподіляються на поверхні нерівномірно через наявність зазначених вище «геометричних» неоднорідностей.

Електричні властивості цих плівок дуже різноманітні – вони можуть бути провідниками, ізоляторами та напівпровідниками, залежно від хімічної природи, товщини, температури поверхні тощо.

Крім хімічних сполук, на поверхні твердого тіла, схильної до впливу навколишнього середовища, завжди існують адсорбційні шари, утворені захопленими поверхнею атомами та молекулами з газового оточення. Через малу товщину адсорбційні шари можуть незначно впливати на електричний опір контактів завдяки тунельному ефекту, проте суттєво впливають на емісійні властивості поверхні, змінюючи роботу виходу електрона з металу. На поверхні металів у реальних умовах завжди є забруднення у вигляді частинок аерозолів, дисперсованих в атмосфері, та інших домішок.

Уявлення про природу контакту твердих тіл приводять до висновку, що наявність тісного зближення поверхонь ще не забезпечує електричний

контакт, оскільки ці поверхні можуть бути покриті ізолюючими плівками. З іншого боку, проходження струму можливе за відсутності «фізичного» контакту тіл.

Проходження струму через такий контакт обумовлено квантовомеханічним ефектом «просочування» електронів через «потенційний бар'єр», утворений діелектриком у контакті. Це «просочування» називається «тунельним ефектом».

Проходження електрона крізь «потенційний» бар'єр є випадковим процесом, ймовірність якого залежить від товщини зазору між поверхнями контактуючих провідників, контактної різниці потенціалів між ними та напруги на контакті. Таким чином, опір «тунельного» контакту між провідниками електричного струму не є нескінченно великим, а має певну величину («тунельний опір»), яка різко зростає зі збільшенням товщини зазору між електродами. За великої товщини зазору струм може виникнути лише внаслідок електричного пробою діелектрика в контакті. Процес пробою ізолюючої техніки, що супроводжується утворенням місць плавлення на електродах і перемикання рідким металом поверхні електродів з подальшим його затвердінням і виникненням електричного контакту, називають «фрітінгом». При цьому в деяких місцях контакту частково зберігається плівка, що ізолює, не пошкоджена в процесі пробою. Повний опір контакту або «перехідний опір» визначається підсумовуванням усіх вкладів від тунельного ефекту, утворення струмопровідних містків і так званого «опору стягування».

У місцях зіткнення провідників лінії струму стягуються до ділянок з малим перетином, які становлять великий опір струму. Цей опір називається опором стягування та визначається за такою формулою [26]:

$$R_{ст} = \frac{\rho}{2an}, \quad (3.1)$$

де ρ – питомий опір матеріалу контактів (мідь), Ом·м;
 a – радіус майданчика фактичного торкання;
 n – кількість точок торкання.

Радіус фактичного торкання залежить від виду деформації матеріалу. За умови пружної деформації радіус майданчика визначається формулою [26]:

$$a = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_k \cdot r}{E}}, \quad (3.2)$$

де F_k – контактне натискання, Н;
 E – модуль пружності матеріалу (міді), Н/м;
 r – радіус.

Контактне натискання (F_k) можливе у діапазоні 0,03...0,3 Н.

Для нашого дослідження вибираємо $F_k = 0,3$ Н.

Радіус задаємо самостійно та вибираємо 40 мкм.

Модуль пружності міді – $10,8 \cdot 10^{10}$ Н/м.

Питомий опір міді за температури 0 °С – $1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Кількість точок торкання (n) – 10.

Припускаючи пружну деформацію, радіус площі торкання дорівнюватиме:

$$a = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,3 \cdot 0,00004}{10,8 \cdot 10^{10}}} = 4,13 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Опір стягування за формулою (3.1) дорівнюватиме:

$$R_{ст} = \frac{1,62 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 4,13 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 1,96 \cdot 10^{12}, \text{ Ом.}$$

На основі отриманих результатів побудуємо графік залежності $R_{ст}$ від F_k (рис. 3.9).

Значення, за якими будемо графік, наведені в таблиці 3.1.

Значення F_k вибрали з шагом 0,03 Н.

Таблиця 3.1 – Значення F_k та R_{ct}

F_k , Н	R_{ct} , Ом
0,03	4,22E-04
0,06	3,35E-04
0,09	2,93E-04
0,12	2,66E-04
0,15	2,47E-04
0,18	2,32E-04
0,21	2,21E-04
0,24	2,11E-04
0,27	2,03E-04
0,3	1,96E-04

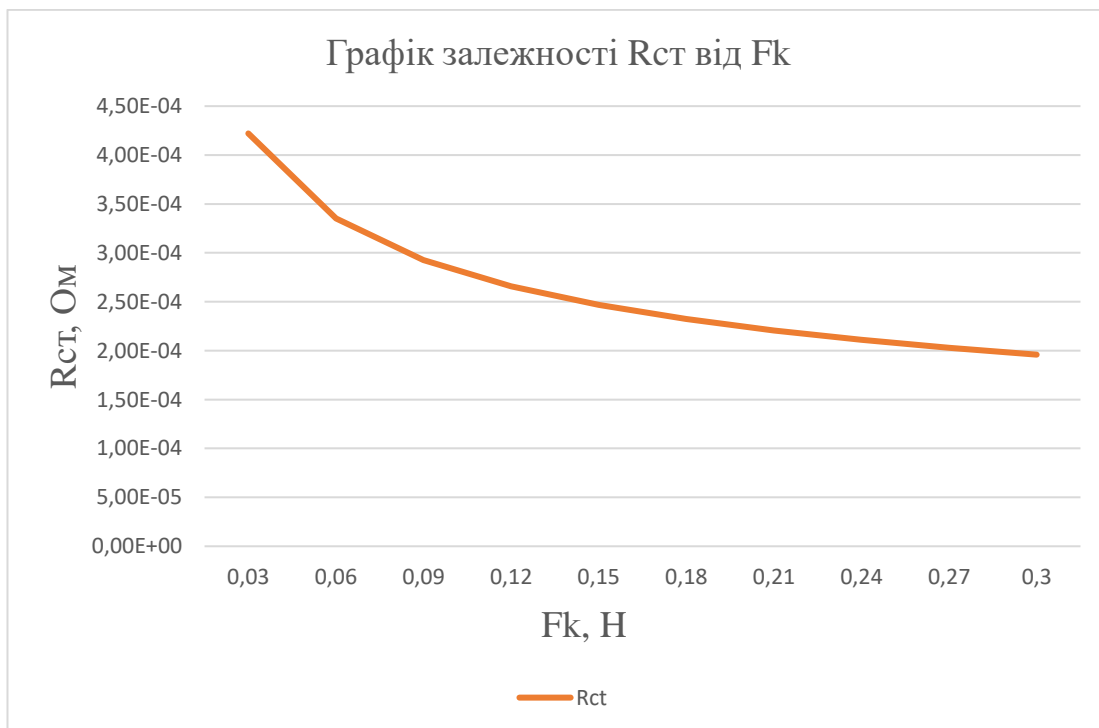


Рисунок 3.9 – Графік залежності R_{ct} від F_k

На рис. 3.9 бачимо залежність опору стягування від контактного натискання и як змінюється опір стягування.

У комутаційному апараті контакти постійно перебувають у динаміці: провідники сходяться та розходяться через певний проміжок часу, включаючи

та вимикаючи струм кола. У цьому виникають нові явища, передусім, виникнення іншого розряду через високу температуру контактуючих провідників (перехідний опір контакту може бути значним у момент його розмикання, що призводить до великого теплового ефекту). У всіх цих випадках теплові й електричні ефекти викликають інтенсивне руйнування – ерозію поверхонь, що контактують. Під час розмикання контакту струм зникає не відразу, і перехідний опір визначається ще одним фактором, який не має місця для замкнутих контактів – опором плазми газового розряду в контактному проміжку.

Під час вибору матеріалів для виготовлення контактних деталей електричних комутаційних та інших апаратів необхідно враховувати цілий ряд факторів – електропровідність, чистоту поверхні та її твердість, температуру плавлення, стійкість до випаровування, механічну зносостійкість та інші властивості. Вимоги до контактних матеріалів щодо перелічених фізичних показників залежить від призначення контактів.

3.5 Висновки до розділу

З розглянутих програмних продуктів для моделювання, можна зробити висновок, що програмний продукт COMSOL Multiphysics є найбільш оптимальним і задовольняє всім заданим вимогам.

Для реалізації дослідження було прийнято рішення розробляти імітаційну модель вузла комутаційних зв'язків мобільного робота Keyestudio.

Також було виконано моделювання комутаційних процесів, а саме дослідження показника електричного струму та розрахунок електричних полів на провідних та діелектричних оболонках та розподіл температури під з'єднувачем.

На основі виконаних досліджень можна зробити деякі висновки, що закон збереження струму стосовно потоку V відбувається та розсіювання

тепла, що виділяється під FPC- з'єднувачем, відбулося, але маленька площа розсіювання.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Для забезпечення безпеки на підприємствах та установах необхідно дотримуватися деяких регламентованих норм охорони праці. Відповідно до них, кімната для роботи оператора та експериментатора повинна знаходитися в окремому приміщенні, обов'язково має бути обладнано штучним та природним освітленням. Для регулювання сили денного світла слід використовувати штори та екрани. Також необхідно мінімізувати наявність відбитого світла.

Приміщення, де працюють установки, може мати високу температуру та дуже низьку вологість через нагрівання обчислювальних машин. Температуру повітря в холодну пору року необхідно регулювати в діапазоні 22 °С – 24 °С, а в теплу пору року 23 °С – 25 °С та приміщення має бути забезпечене засобом провітрювання та кондиціонування повітря. Відносна вологість повітря під час роботи у приміщенні має бути у межах 40 % – 60 %. Також, подача свіжого повітря має регулюватися, 20 м³ на одну особу.

Машини, механізми, пристрої та інструменти, що застосовуються в електроустановках, повинні бути справні та випробувані відповідно до чинних нормативних документів та термінів.

Електроустаткування, конструкції, комплектуючі, вузли вітчизняного та іноземного виробництва мають задовольняти вимоги чинних нормативних документів в Україні.

У разі постачання електрообладнання з-за кордону організація-замовник має отримати сертифікат відповідно до укладення контракту на його постачання.

Паспорт, інструкція та інша експлуатаційна документація поставляється з обладнанням або виробами, повинна мати переклад українською мовою.

Можливі відхилення від нормативної документації мають бути узгоджені з Держнаглядом, Держстандартом та організацією замовником до укладення контракту на їхнє постачання. Копії погоджень та сертифікати додаються до паспорта обладнання або виробу.

Надмірний шум також може впливати на працездатність людини та знижувати її через зниження уваги, підвищення втоми та дратівливості, впливу на фізіологічні показники. Усе це знижує працездатність людини.

Рівень шуму на робочому місці не повинен перевищувати 50 дБ.

Для контролю за рівнем шуму стіни та стеля у робочому приміщенні можуть бути обшиті шумоізоляційним матеріалом.

ВИСНОВКИ

Останнім часом технологія приладобудування виходить з традиційного дизайну жорсткої електроніки в майбутнє гнучких форм-факторів. Розвиток гнучкої технології пропонує нові функціональні можливості, які раніше не були доступні, за допомогою гнучкої конструкції виробів.

Було проаналізовано існуючі мобільні робототехнічні платформи та визначено конструктивні особливості робототехнічних платформ.

Було проаналізовано поліімідні структури і їх призначення.

Проаналізували аналоги та визначили, які компоненти підходять для комутаційної системи та вибрали мобільну платформу Keyestudio 4WD BT Robot car V2.0.

Виконали підбір компонентів комутаційної системи для робототехнічної платформи та розробили схему комутаційних зв'язків.

Побудували 3D-модель комутаційної системи мобільної робототехнічної платформи у середовищі COMSOL Multiphysics.

Виконали дослідження конструкції за допомогою середовища COMSOL Multiphysics на закон збереження струму стосовно потоку V та розсіювання тепла, що виділяється під FPC-роз'єму. У дослідженні на закон збереження струму йде розподіл електричного струму при напрузі 5 В та 20 мА постійного струму. У дослідженні на розсіювання тепла, що виділяється під FPC-з'єднувачем, з'ясували, наскільки теплонавантажений контакт. Це маленька площа розсіювання. Початковий температурний режим був приблизно 20 °С (кімнатна температура) або 293,15 К. За результатом отримали трішки вищу температуру +23 °С, отже, площа розсіювання тепла маленька.

Розробили математичну модель параметрів гнучких комутаційних структур, а саме дослідження опору контактів (R_{ct}), який дорівнює $1,96 \cdot 10^{12}$ Ом. Також було побудовано графік залежності R_{ct} від F_k .

Таким чином, за результатами проведеного аналізу особливостей існуючих мобільних роботів і переваг застосування у їх складі ГКС виконано побудову комп'ютерної моделі комутаційної системи мобільної робототехнічної платформи Keyestudio 4WD BT Robot car V2.0 з використанням поліімідних структур.

ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з виконання та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка освітньо-професійної програми «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Н. П. Демська, Ю.М. Олександров, Р. В. Артюх, Є. А. Разумов-Фризюк. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 40 с.
2. ДСТУ 3008: 2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – Офіц. Вид. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с. – (Державний стандарт України).
3. Система управління робототехнічною платформою на основі радіомодуля та акселерометра [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/39212/1/Сомонюк_ДП_2019.pdf.
4. Робототехнічні системи (РТС), їх структура [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=67484>.
5. Фрезеровка [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kuka.com/ru-ru/продукция-услуги/производственные-технологии/фрезеровка>.
6. Мобильный робот LD Omron [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://m-robots.ru/robots/ld-omron/>.
7. A Mobile Robot Driven by Miniature Onboard [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.medicaldevice-network.com/projects/mobile-robot/>.
8. KMR iiwa [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kuka.com/ru-ru/продукция-услуги/мобильность/мобильные-роботы/kmr-iiwa>.
9. Шишов О. В. Элементы систем автоматизации: промышленные компьютеры : учебное пособие / О. В. Шишов. – М., Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 98 с.

10. Volkunievich_magistr.pdf [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31794/1/Volkunievich_magistr.pdf.
11. Технологічне забезпечення якості гнучких комутаційних структур: монографія / І. Ш. Невлюдов, І. В. Боцман, В. В. Невлюдова, Є. А. Разумов-Фризюк. – Кривий ріг: КК НАУ, 2018. – 256 с.
12. Невлюдов І. Ш. Розробка параметричної моделі гнучких комутаційних структур для дослідження механічних впливів на них / І. Ш. Невлюдов, С. П. Новоселов, І. В. Боцман, Н. П. Демська // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»: матеріали конференції (Кременчук, 2-4 листопада 2018 р.). – Кременчук: КрНУ, 2018. – С. 141-143.
13. Жарікова І. В. Експериментальні дослідження параметрів гнучких шлейфів під впливом факторів дестабілізації / І. В. Жарікова В. В. Невлюдова, А. С. Боцман // Технологія приладобудування. – Харків: НДТІП, 2016. – С. 47-49.
14. Jonathan E, Jack C, Chang L. Development of polyimide flexible tactile sensor skin. J. Micromech. Microeng.2003;13:359-366.
15. Болотник Н. Н. Робототехнические системы / А. А. Жуков, Д. В. Козлов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 4. – С. 233-239.
16. Robotic Flexible Electronics with Self-Bendable Films [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/326561610_Robotic_Flexible_Electronics_with_Self-Bendable_Films.
17. Flexible and Stretchable Electronics Paving the Way for Soft Robotic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/275141256_Flexible_and_Stretchable_Electronics_Paving_the_Way_for_Soft_Robotics.
18. Соединители для плоских кабелей (FPC, Micro-Match, AMP-Latch) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.compel.ru/lib/59120>.
19. XF2M – серия разъемов производства OMRON [Електронний

ресурс]. – Режим доступу: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=xf2m>.

20. Программный пакет COMSOL Multiphysics OMRON [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics>.

21. О программной системе ANSYS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ik.3dscorpion.com.ua/index.php?ukey=auxpage_95.

22. SolidWorks [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>.

23. XF2M [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://imrad.com.ua/userdata/modules/productFiles/aQSn3P90_XF2M.pdf.

24. Плёнка полиимидная ПМ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://elmica.ru/nasha-produkciya/elektroizolyacionnye-i-termostojkie-materialy/plenochnye-elektroizolyacionnye-materialy/plenka-poliimidnaya-pm.html>.

25. Ігнатенко Д. В. Аналіз шляхів модернізації комутаційної системи мобільної робототехнічної платформи з використанням гнучких структур // Збірник студентських наукових статей «Автоматизація та приладобудування» «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2021 (Випуск 2) [Електронне видання]. – Харків 2021. – 2021. – №2. – С. 58-62.

26. Электрические контакты [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://lms.tpu.ru>.