

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження методів моделювання мікроелектромеханічних систем  
(тема)

Виконав:  
здобувач 2 року навчання  
групи ЕППМ-23-1

Чернявський О. В.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Електронні прилади та пристрої  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. МЕЕПП Глухов О. В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Бондаренко І.М.  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженеріїКафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроївРівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 171 Електроніка  
(код і повна назва)Тип програми освітньо-професійнаОсвітня програма Електронні прилади та пристрої  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУздобувачеві Чернявському Олександр Вікторовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)1. Тема роботи Дослідження методів моделювання мікроелектромеханічних системзатверджена наказом університету від 10 грудня 2024 р. № 1290Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи мікрооптоелектромеханічний акселерометр, ANSYS

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

Огляд методів моделювання мікроелектромеханічних системРозробка математичних моделей підсистем мікрооптоелектромеханічної системиДослідження розподілених мікрооптоелектромеханічних систем

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) \_\_\_\_\_  
 Презентаційний матеріал – 10 слайдів

---



---



---



---



---



---



---



---

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	09.12.2024	виконано
2	Аналітичний огляд літературних джерел за темою роботи	10.12.2024	виконано
3	Аналіз методів моделювання мікроелектромеханічних систем	16.12.2024	виконано
4	Розробка математичних моделей підсистем мікрооптоелектромеханічної системи	20.12.2024	виконано
5	Дослідження розподілених мікрооптоелектромеханічних систем	22.12.2024	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	26.12.2024	виконано
7	Проходження нормоконтролю, рецензування	05.01.2025	виконано
8	Захист кваліфікаційної роботи	15.01.2025	виконано

Дата видачі завдання 09 грудня 2024 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
 (підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. каф. МЕЕПГ Глухов О.В.  
 (підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 40 с., 16 рис., 2 додатки, 19 джерел.

МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА,  
МІКРООПТОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА, МОДЕЛЮВАННЯ,  
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, МЕТОД КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ІНТЕРНЕТ  
РЕЧЕЙ

Об'єкт дослідження – методи моделювання мікроелектромеханічних систем.

Мета роботи – розробка математичних моделей підсистем мікрооптоелектромеханічної системи на прикладі мікрооптоелектромеханічного акселерометра.

Метод дослідження – аналітичний аналіз існуючих методів моделювання мікроелектромеханічних систем з подальшим обґрунтуванням конструкції підсистем мікрооптоелектромеханічної системи та проведення математичного моделювання, отримання вихідних параметрів.

Отримані результати підтверджують актуальність розвитку даного напрямку й вказують на перспективність досліджень у цій області.

## ABSTRACT

Explanatory note consists of: 40 p., 16 fig., 2 applications, 19 sources.

MICROELECTROMECHANICAL SYSTEM, MICRO-OPTOELECTROMECHANICAL SYSTEM, MODELING, MATHEMATICAL MODEL, FINITE ELEMENT METHOD, INTERNET OF THINGS

The object of research is methods of modelling microelectromechanical systems.

The purpose of the work is to develop mathematical models of subsystems of micro-optoelectromechanical systems on the example of a micro-optoelectromechanical accelerometer.

The research method is an analytical analysis of existing methods of modelling microelectromechanical systems with further substantiation of the design of subsystems of the micro-optoelectromechanical system and mathematical modelling, obtaining the output parameters.

The obtained results confirm the relevance of the development of this area and indicate the prospects for research in this area.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 МАРШРУТ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРООПТОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ .....	9
1.1 Методи моделювання мікроелектромеханічних систем.....	10
1.2.1 Методи моделювання механічних підсистем .....	10
1.2.2 Методи моделювання електронних підсистем .....	15
1.2 Інтернет речей .....	17
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПІДСИСТЕМ МОЕМС НА ПРИКЛАДІ МОЕМ АКСЕЛЕРОМЕТРА .....	20
2.1 Отримання структури мікрооптоелектромеханічного акселерометра .....	20
2.1.1 Математична модель механічної підсистеми МОЕМ акселерометра ..	20
2.1.2 Математична модель оптичної підсистеми МОЕМ акселерометра .....	24
2.1.3 Математична модель електронної підсистеми МОЕМ акселерометра	29
3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ МОЕМС НА ПРИКЛАДІ МОЕМ АКСЕЛЕРОМЕТРА .....	32
3.1 Математична модель механічної підсистеми розподіленого МОЕМ акселерометра.....	32
3.2 Розробка програмного модуля, що реалізує алгоритм отримання математичної моделі механічної підсистеми МОЕМ акселерометра .....	34
ВИСНОВКИ.....	37
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	39
ДОДАТОК А .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ДОДАТОК Б .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## ВСТУП

З моменту створення першого транзистора в 1948 році в лабораторії Белла, безперервно йшло дослідження методів зменшення розмірів компонентів та надання їм більшої функціональності. У 1960-х роках з'явилися перші мікросхеми на основі тонкоплівкової технології. У 1961 році було створено першу інтегральну схему на основі монокристалічної напівпровідникової технології. Створення першої інтегральної схеми почало розвитку мікроелектроніки.

Подальший розвиток мікроелектроніки, програмного забезпечення для розробки та моделювання призвів до появи комплексів спеціалізованого програмного забезпечення, за допомогою якого здійснюється розробка та моделювання пристроїв з різними областями застосування (від застосування у рідких та агресивних середовищах до аерокосмічного застосування). Програмний комплекс Ansys Multiphysics – дозволяє проводити математичне моделювання механічних частин пристроїв, що розробляються в різних середовищах за допомогою кінцевих елементів; програмний комплекс Matlab/Simulink є потужним математичним комплексом для розрахунків на основі матричних рівнянь; ProEngineer/Creo Elements – програмний комплекс для розробки тривимірних моделей та розробки технологічного маршруту виробництва; COMSOL multiphysics – програмний комплекс, що включає пакети програм для розрахунку електричних, механічних, рідинних, хімічних систем, а також пакет інтерфейсів для взаємодії з іншими програмними комплексами.

Подальший розвиток мікроелектроніки та мікроелектронних пристроїв, а також все більше застосування мікроелектронних пристроїв у повсякденному житті призвело до появи Інтернету речей, де відбувається взаємодія великої кількості електронних систем та датчиків у реальному часі. Використання мікроелектромеханічних систем (МЕМС) та мікрооптоелектромеханічних

(МОЕМ) пристроїв дозволяє забезпечити взаємодію між фізичними об'єктами та віртуальним середовищем.

MEMS та МОЕМ пристрої базуються на використанні різних фізичних ефектів: електричних, оптичних, механічних та ін. Експериментальні дослідження таких пристроїв пов'язані з великими часовими витратами у зв'язку зі складністю створення експериментальних зразків, що робить розробку алгоритмів моделювання та автоматизованого проектування подібних пристроїв актуальним завданням.

Основною тенденцією розвитку методів математичного моделювання є моделювання складних систем, що поєднують у собі різні фізичні ефекти, оптичні, електричні та механічні. Подібні методи моделювання є міждисциплінарними та нетривіальними завданнями.

## 1 МАРШРУТ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРООПТОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Маршрут автоматизації системного проектування МОЕМС і, як наслідок, отримання структури МОЕМ системи, складається з кількох послідовних етапів. Спочатку створюється кілька варіантів реалізації МОЕМС, тобто початкове графічне уявлення об'єкта – структури, схеми та алгоритми.

Існуючі методи моделювання систем необхідно поділити на адекватні та неадекватні методи. Під неадекватними методами мається на увазі невідповідність можливостей методів та застосовуваних вимог. Критерії відсіву неадекватних методів:

- неможливо врахувати оптичні ефекти залежно від впливів навколишнього середовища під час взаємодії з механічними підсистемами;
- універсальність застосування для моделювання схожих за геометричними формами об'єктів, але відносяться до областей мікроелектроніки, що не перетинаються;
- неможливість моделювання в єдиному циклі кількох підсистем, що ґрунтуються на різних фізичних ефектах;
- обмеження за розмірними параметрами.

Все викладене змушує розробляти принципово нові алгоритми математичного моделювання механічної, оптичної та електронної підсистем, а також отримання структури пристрою після проходження маршруту автоматизації системного проектування складних мікрооптоелектромеханічних систем. Для того, щоб математична модель складної системи адекватно відображала створювану систему, необхідно проаналізувати основні проблеми математичного моделювання складних систем.

## 1.1 Методи моделювання мікроелектромеханічних систем

### 1.2.1 Методи моделювання механічних підсистем

Розвиток математичного моделювання нерозривно пов'язаний з розвитком математичних методів опису об'єктів, оскільки для опису поведінки пристрою застосовуються диференціальні рівняння у частинних або загальних змінних  $n$ -го порядку.

Складність математичного моделювання полягає у створенні адекватної математичної моделі, яка має точно відображати те, який вигляд має мати пристрій, а також давати змогу отримувати достовірні результати після моделювання із застосуванням певних навантажень. Основний метод, що застосовується для розв'язання диференціальних рівнянь, які описують математичну модель, є метод кінцевих елементів.

Метод кінцевих елементів (МКЕ) – основний метод сучасної будівельної механіки, що лежить в основі переважної більшості сучасних програмних комплексів, призначених для виконання розрахунків будівельних конструкцій на ЕОМ.

Метод кінцевих елементів, як і багато інших чисельних методів, ґрунтується на представленні реальної конструкції її дискретною моделлю і заміні диференціальних рівнянь, що описують НДС суцільних тіл, системою алгебраїчних рівнянь. Водночас МКЕ допускає ясну геометричну, конструктивну та фізичну інтерпретацію.

Для простих пристроїв та конструкцій, що ґрунтуються на одному типі фізичних ефектів, достатньо проводити математичне моделювання в рамках одного програмного комплексу.

Для пристроїв, заснованих на поєднанні різних фізичних ефектів, таких як оптичні та механічні, або оптичні, механічні та електричні, необхідне проведення складніших видів аналізу, крім аналізу реакції на навантаження. До

таких видів аналізу належить пошук власних значень при аналізі математичної моделі та пошуку мод із застосуванням блочного методу Ланцоша.

Для моделювання механічних систем застосовується програмний комплекс ANSYS. Цей програмний комплекс дозволяє проводити різні види аналізів при різних навантаженнях. Основною перевагою даного програмного комплексу є застосування для розрахунків методу кінцевих елементів.

Розбиття математичної моделі у програмному комплексі ANSYS автоматизовано. У процесі розбиття ядро (математичний розв'язувач) програмного комплексу аналізує лінійні розміри математичної моделі (рис. 1.1) механічної підсистеми МОЕМ акселерометра та здійснює її розбиття на кінцеві елементи (рис. 1.2). Таке розбиття є довільним і випадковим, оскільки в цьому разі лінійні розміри математичної моделі кратні розмірам кінцевих елементів.

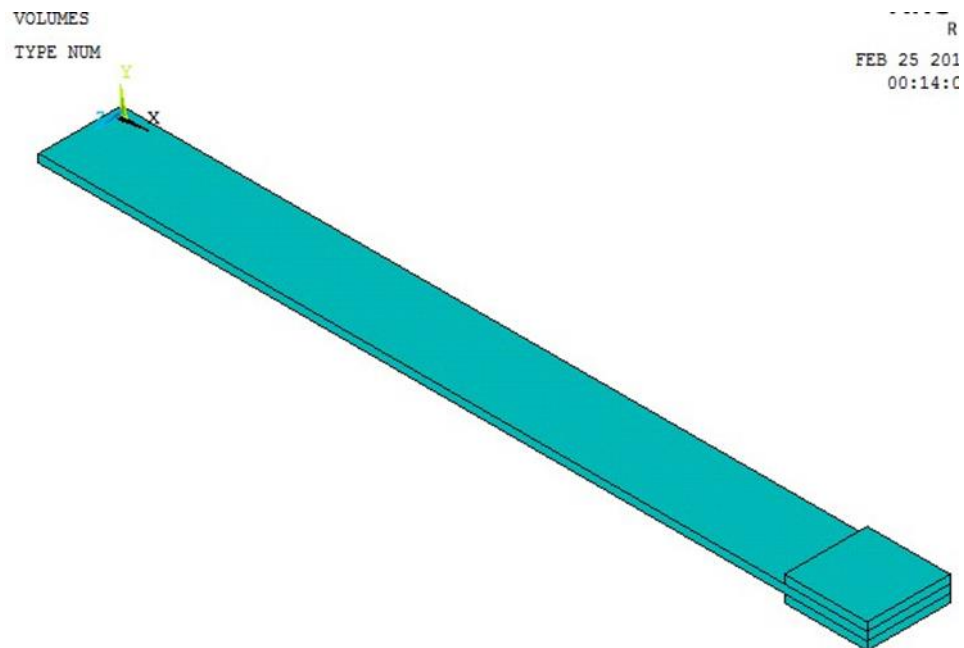


Рисунок 1.1 – Спрощена геометрична модель механічної підсистеми  
МОЕМ акселерометра

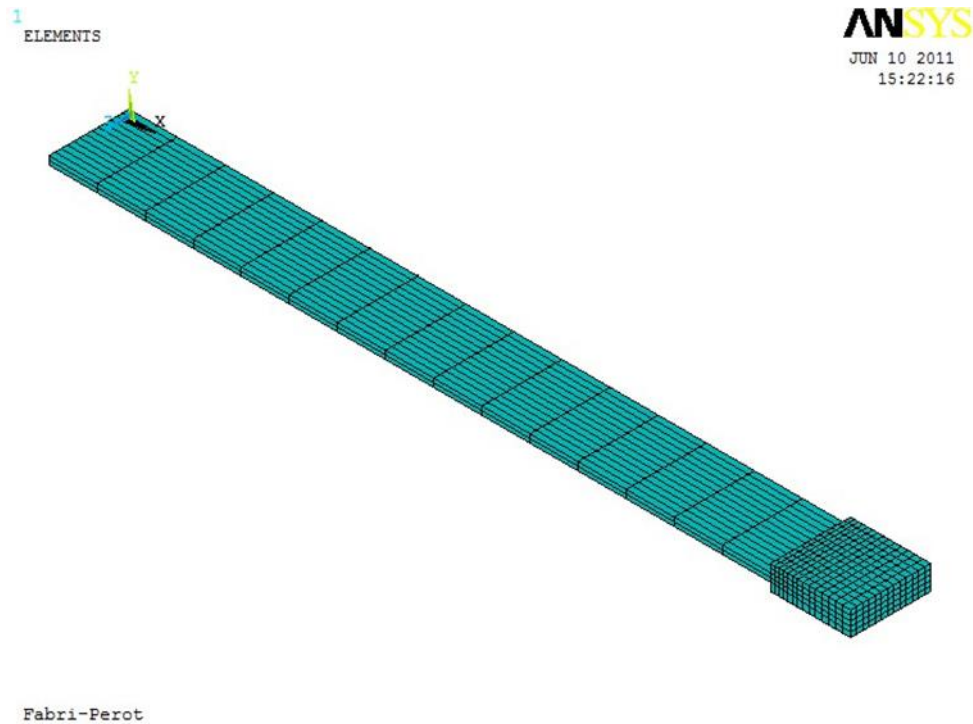


Рисунок 1.2 – Кінцево-елементна модель механічної підсистеми МОЕМ акселерометра

Актуальною задачею є задача міждисциплінарного багатомасштабного моделювання, оскільки наразі ведуться активні розробки пристроїв, що поєднують у собі різні фізичні ефекти.

Головною проблемою математичного моделювання цих пристроїв є неможливість моделювання оптичних та механічних ефектів в одному програмному комплексі. Нині немає програмних комплексів математичного моделювання, що дають змогу здійснювати моделювання механічних та оптичних систем спільно.

Програмним комплексом, що дає змогу проводити моделювання складних систем, описаних мовою формального опису, є MATLAB з доповненням Simulink.

Найважливішим властивістю MATLAB є спрямованість його ядра на розв'язання матричних рівнянь. Нині розв'язання задач математичного моделювання механічних систем із застосуванням методу кінцевих елементів проводиться за такими етапами.

Основним підходом до моделювання механічних систем нині став метод багатомасштабного ієрархічного моделювання.

Моделювання МОЕМС є міждисциплінарним завданням. На рисунку 1.3 наведено діаграму протиріч, що виникають при спробі провести моделювання складної МОЕМС.



Рисунок 1.3 – Діаграма протиріч міждисциплінарного моделювання

Представимо структуру деякого об'єкта у вигляді безлічі елементів (рис. 1.4) і зв'язків між ними.

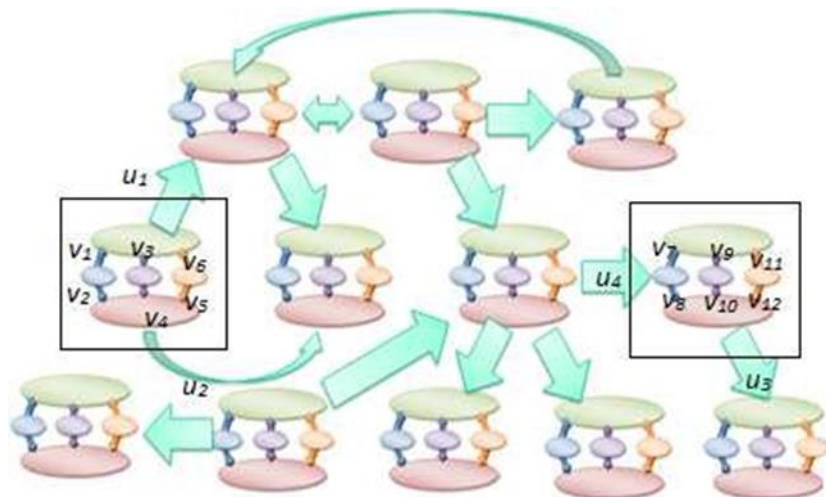


Рисунок 1.4 – Представлення структури складної МОЕМС

Виокремлення відповідно до ієрархічного підходу в структурі об'єкта деякої підмножини елементів – блоків (на рисунку виділені квадратами). Нехай стан кожного зв'язку характеризується однією фазовою змінною  $v_i$ ,  $z_j$  або  $u_k$ . Тут  $v_i$  відноситься до внутрішніх зв'язків між елементами даного блоку,  $z_j$  та  $u_k$  відносяться до виходів і входів блоку відповідно.

Моделями елементів блоку  $A$  є рівняння, що зв'язують вхідні та вихідні змінні:

$$\begin{aligned} f_1(v_1, u_1) &= 0, \\ f_2(v_2, u_2) &= 0, \\ f_3(v_2, u_3, v_4) &= 0, \\ f_9(v_9, v_8, z_2) &= 0 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Повна модель блоку є системою рівнянь (1.2):

$$\begin{aligned} F(V, U) &= 0, \\ Z &= \psi(V, U), \end{aligned} \tag{1.2}$$

де  $V$ ,  $Z$  і  $U$  – вектори внутрішніх, вихідних та вхідних фазових змінних блоку.

При великій кількості елементів розмірність вектора  $V$  та порядок системи рівнянь (1.2) стають надмірно великими та потребують спрощення.

При переході до вищого ієрархічного рівня спрощення вони ґрунтуються на виключенні з моделі вектора внутрішніх змінних  $V$ . Отримана модель є системою рівнянь суттєво меншої розмірності, ніж повна модель (1.2), і називається макромоделлю.

$$\varphi(V, U) = 0 \tag{1.3}$$

Отже, макромодель уже не описує процеси всередині блоку, а характеризує тільки процеси взаємодії даного блоку з іншими у складі системи блоків.

Моделі (1.2) та (1.3) відносяться одна до одної як повна модель і макромодель на  $n$ -му рівні ієрархії. На вищому  $(n-1)$ -му рівні блок А розглядається як елемент, і макромодель (1.3) стає моделлю елемента А. Отже, моделі (1.1) та (1.3) відносяться одна до одної як моделі елементів сусідніх ієрархічних рівнів. З моделей типу (1.3) може бути складена повна модель системи на  $(n-1)$  рівні.

### 1.2.2 Методи моделювання електронних підсистем

Моделювання електронних систем нині є вивченою областю, оскільки паралельно з розробкою МЕМС завжди розробляється різна апаратура. І МЕМС і різні РЕА можуть бути представлені у вигляді еквівалентних принципових електричних схем. Такі схеми розраховуються на основі законів Кірхгофа.

Спільна робота трьох підсистем заснована на взаємодії за допомогою стикувальних параметрів. Рухома маса механічної підсистеми під дією прискорення змінює своє положення, яке характеризується кутом  $\alpha$ . Кут  $\alpha$  є стикувальним параметром між механічною підсистемою і оптичною підсистемою. Для оптичної підсистеми кут  $\alpha$  задає зміщення спектра світлового пучка відносно стану спокою. Зміщення спектру  $\Delta\lambda$  фіксується електронною підсистемою, яка перетворює  $\Delta\lambda$  у лінійне прискорення.

Існує величезна номенклатура різних програмних продуктів і комплексів для моделювання електронних систем. Ці комплекси відрізняються функціоналом, методами аналізу і точністю результатів моделювання електронних схем, а також модулями розширення основного функціоналу програми або програмного комплексу.

Основними засобами для моделювання електронних систем є програмні комплекси MATLAB з доповненням Simulink, а також програмний комплекс проектування та розробки електронної апаратури Altium Designer.

Основними перевагами MATLAB/Simulink є:

- робота з матрицями та матричними рівняннями;
- можливість моделювання аналого-цифрових систем, описаних мовою формального опису VHDL-AMS;
- широкий спектр об'єктів моделювання та методів аналізу;
- бібліотеки готових модулів, елементів, блоків тощо.

До недоліків можна віднести складність опису систем, оскільки основна робота найчастіше ведеться у консольному режимі.

Altium Designer є потужним середовищем розробки та проектування електронної апаратури, одним з модулів якої є модуль розробки принципів схем, а також моделювання перехідних процесів та аналізу розроблених схем. Основним недоліком даного комплексу є його вузька спрямованість на розробку електронної апаратури, а не МЕМС пристроїв.

В якості мови для створення модуля, що реалізує алгоритм адаптації методу багатомасштабного ієрархічного моделювання, використовується мова APDL, яка є вбудованою мовою для написання модулів у програмному комплексі ANSYS.

APDL – це адаптована мова програмування, що є розвитком мови ФОРТРАН з можливістю створення макросів та роботи з графічним інтерфейсом у застосуванні до функціоналу програмного комплексу ANSYS.

Мова APDL є основою для вирішення складних завдань, таких як побудова адаптованої сітки кінцевих елементів, оптимізаційний розрахунок і т. д. При написанні доповнень на мові APDL не обов'язково явно вказувати тип змінної або присвоювати їй значення. ANSYS за замовчуванням рахує тип змінної подвійної точності і надає їй значення близьке до нуля, приблизно  $2^{-100}$ . ANSYS використовує два типи параметрів: скалярне значення та масив.

## 1.2 Інтернет речей

Поняття «інтернет речей» ґрунтується на концепції обчислювальної мережі фізичних об'єктів («речей»), оснащених вбудованими технологіями для взаємодії один з одним або із зовнішнім середовищем. Ця мережа розглядається як явище, здатне перебудувати економічні та суспільні процеси, що виключає з частини дій та операцій необхідність участі людини.

Концепція сформульована у 1999 році як осмислення перспектив широкого застосування засобів радіочастотної ідентифікації для взаємодії фізичних об'єктів між собою та із зовнішнім оточенням. Наповнення концепції «інтернету речей» різноманітним технологічним змістом та впровадження практичних рішень для її реалізації починаючи з 2010-х років вважається висхідним трендом в інформаційних технологіях, насамперед завдяки повсюдному поширенню бездротових мереж, появі хмарних обчислень, розвитку технологій міжмашинної взаємодії, початку активного переходу на IPv6 та освоєння програмно-конфігурованих мереж.

Поняття «інтернет речей» базується на трьох технологіях.

Перша з них – це засоби ідентифікації. Участь у «інтернеті речей» об'єктів фізичного світу, необов'язково оснащених інтерфейсами підключення до мереж передачі даних, вимагає застосування технологій ідентифікації об'єктів («речей»). Хоча тригером для появи концепції стала технологія RFID, але як такі технології можуть використовуватися всі засоби, що застосовуються для автоматичної ідентифікації: оптично розпізнавані ідентифікатори (штрих-коди, Data Matrix, QR-коди), засоби визначення місцезнаходження в режимі реального часу. При всеосяжному поширенні «інтернету речей» важливо забезпечити унікальність ідентифікаторів об'єктів, що, своєю чергою, вимагає стандартизації.

Для об'єктів, безпосередньо підключених до інтернет-мереж традиційний ідентифікатор – MAC-адреса мережевого адаптера, що дозволяє ідентифікувати пристрій на канальному рівні, водночас діапазон доступних адрес практично

вичерпний (248 адрес у просторі MAC-48), а використання ідентифікатора каналного рівня не надто зручне для додатків. Ширші можливості щодо ідентифікації для таких пристроїв дає протокол IPv6, що забезпечує унікальними адресами мережевого рівня щонайменше 300 млн. пристроїв на одного жителя Землі.

Наступною невід'ємною частиною «інтернету речей» є засоби вимірювання. Особливу роль в «інтернеті речей» відіграють засоби вимірювання, що забезпечують перетворення відомостей про зовнішнє середовище в машинозчитувані дані, і тим самим наповнюють обчислювальне середовище значущою інформацією. Використовується широкий клас засобів вимірювання від елементарних датчиків (наприклад, температури, тиску, освітленості), приладів обліку споживання (таких, як інтелектуальні лічильники) до складних інтегрованих вимірювальних систем. У межах концепції «інтернету речей» важливе об'єднання засобів вимірювання у мережі (такі, як бездротові сенсорні мережі, вимірювальні комплекси), за рахунок чого можлива побудова систем міжмашинної взаємодії.

Як особлива практична проблема впровадження «інтернету речей» відзначається необхідність забезпечення максимальної автономності засобів вимірювання, насамперед, проблема енергопостачання датчиків. Знаходження ефективних рішень, що забезпечують автономне живлення сенсорів (використання фотоелементів, перетворення енергії вібрації, повітряних потоків, використання бездротової передачі електрики) дозволяє масштабувати сенсорні мережі без підвищення витрат на обслуговування (у вигляді зміни батарейок або підзарядки акумуляторів датчиків).

Одним із рішень у галузі енергозберігаючих датчиків може стати розроблений мікрооптоелектромеханічний акселерометр на основі інтерферометра Фабрі-Перо. Він заснований на комбінації оптичних та механічних ефектів. Комбінація цього датчика із сонячними батареями та RFID-мітками дасть змогу створювати енергонезалежні вимірювальні модулі.

І останньою частиною «інтернету речей» є засоби передачі даних. Спектр можливих технологій передачі даних охоплює всі можливі засоби бездротових та провідних мереж.

Для бездротової передачі даних особливо важливу роль у побудові «інтернету речей» відіграють такі якості, як ефективність в умовах низьких швидкостей, відмовостійкість, адаптивність, можливість самоорганізації. Основний інтерес у цій якості представляє стандарт IEEE 802.15.4, що визначає фізичний шар та управління доступом для організації енергоефективних персональних мереж, і є основою таких протоколів, як ZigBee, WirelessHart, MiWi, 6LoWPAN.

Серед провідних технологій важливу роль у проникненні «інтернету речей» відіграють рішення PLC – технології побудови мереж передачі даних по лініях електропередач, оскільки в багатьох додатках є доступ до електромереж (наприклад, торгові автомати, банкомати, інтелектуальні лічильники, контролери освітлення спочатку підключені до мережі електропостачання). 6LoWPAN, що реалізує шар IPv6 як над IEEE 802.15.4, так і над PLC, будучи відкритим протоколом, IETF, що стандартизується, відзначається як особливо важливий для розвитку «інтернету речей».

## 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПІДСИСТЕМ МОЕМС НА ПРИКЛАДІ МОЕМ АКСЕЛЕРОМЕТРА

У складних МОЕМ-системах, що розробляються, часто буває складно виділити схожі риси, за якими їх можна узагальнити і провести алгоритмічну адаптацію на основі загальних властивостей, властивих різним МОЕМ-системам. Зважаючи на це, як досліджуваний пристрій узято мікрооптоелектромеханічний акселерометр на основі інтерферометра Фабрі-Перо. Він складається з трьох основних підсистем – механічної, оптичної та електронної.

### 2.1 Отримання структури мікрооптоелектромеханічного акселерометра

Необхідно запропонувати конструкції механічної, оптичної та електронної підсистем. Із запропонованими конструкціями потім проводиться етап математичного моделювання та отримання вихідних параметрів.

#### 2.1.1 Математична модель механічної підсистеми МОЕМ акселерометра

Механічна підсистема має мати геометричні розміри не більше 500 мкм х 500 мкм х 100 мкм.

Механічна підсистема являє собою рухому масу у вигляді тонкої пластини з розмірами 200х20х2 мкм (рис. 1.2), закріплену на рамці з геометричними розмірами 500 мкм х 500 мкм х 20 мкм. Оскільки рухома маса еквівалентна закладенню, то допущено спрощення рамки з метою полегшення математичного моделювання.

З одного боку ця пластина має обмеження ступенів свободи, аналогічні обмеженням ступенів свободи закладення. На протилежному кінці рухомої маси розташовані з обох боків інтерферометри Фабрі-Перо з розмірами 20х20х2 мкм.

Розташування з обох боків рухомої маси дає змогу отримувати зрештою усереднене значення переміщення, отже, отримуємо диференціальний акселерометр.

Для отримання адекватної математичної моделі механічної підсистеми необхідно враховувати різні чинники та параметри. Одним із найважливіших чинників, що впливають на вихідні характеристики системи, є точність виготовлення рухомої маси. Оскільки на етапах травлення підкладки для отримання необхідної конфігурації шару можливе виникнення різних дефектів. Невідповідність фактичних розмірів рухомої маси є дефектом, який значною мірою впливає на вихідні характеристики всієї системи в цілому. Далі розглянемо докладно процес створення математичної моделі, а також процес отримання кінцево-елементної моделі з певними параметрами кінцевих елементів.

Програмний комплекс ANSYS дає змогу проводити створення математичних моделей різного ступеня складності та отримувати їхній опис мовою формального опису VHDL-AMS.

Створення математичної моделі механічної підсистеми є тривіальним завданням.

На першому етапі вибирають тип кінцевого елемента. Для дослідження поведінки розроблюваного пристрою за певних навантажень обрано моделі SOLID45 і SOLID122 для електростатики.

SOLID45 – 3х-вимірний кінцевий елемент 1-го порядку для розв’язання задач моделювання деформації твердих тіл (рисунок 2.1).

Для забезпечення високої точності розрахунків необхідно вибрати кінцевий елемент коректно.

Елемент має властивості пластичності, повзучості, радіаційного набрякання, зміни жорсткості під час застосування навантажень, великих переміщень і великих деформацій. Для контролю скручування елемента є опція інтегрування зниженого порядку.

Версією елемента SOLID45 2-го порядку є елемент SOLID95.

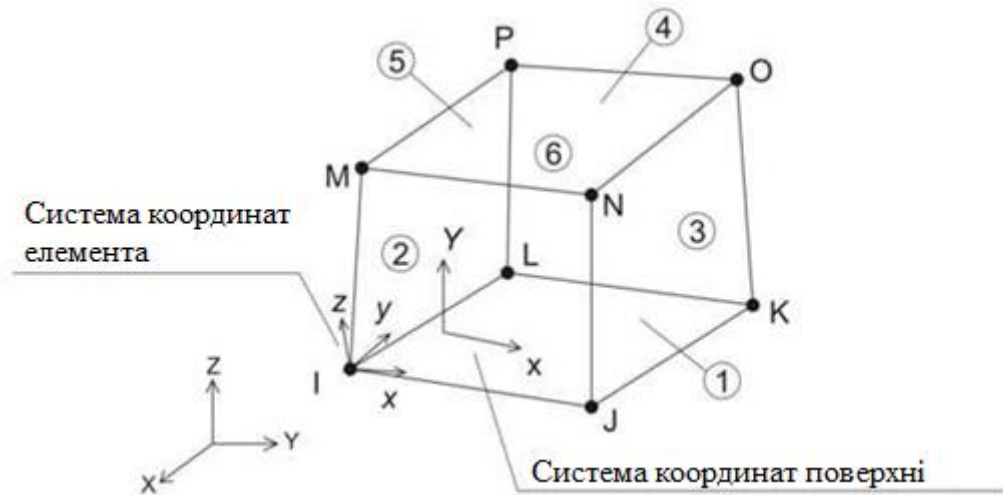


Рисунок 2.1 – Геометрія елемента SOLID45

SOLID122 – 3х-вимірний кінцевий елемент із 20 вузлами для розв’язання задач моделювання деформації та електростатики твердих тіл (рисунок 2.2). Елемент має один ступінь свободи і допускає застосування напруги до кожного вузла. Це допускає застосування інших форм елемента, таких як тетраедр, піраміда або призма без значної втрати точності.

Цей елемент застосовується при тривимірному електростатичному моделюванні.

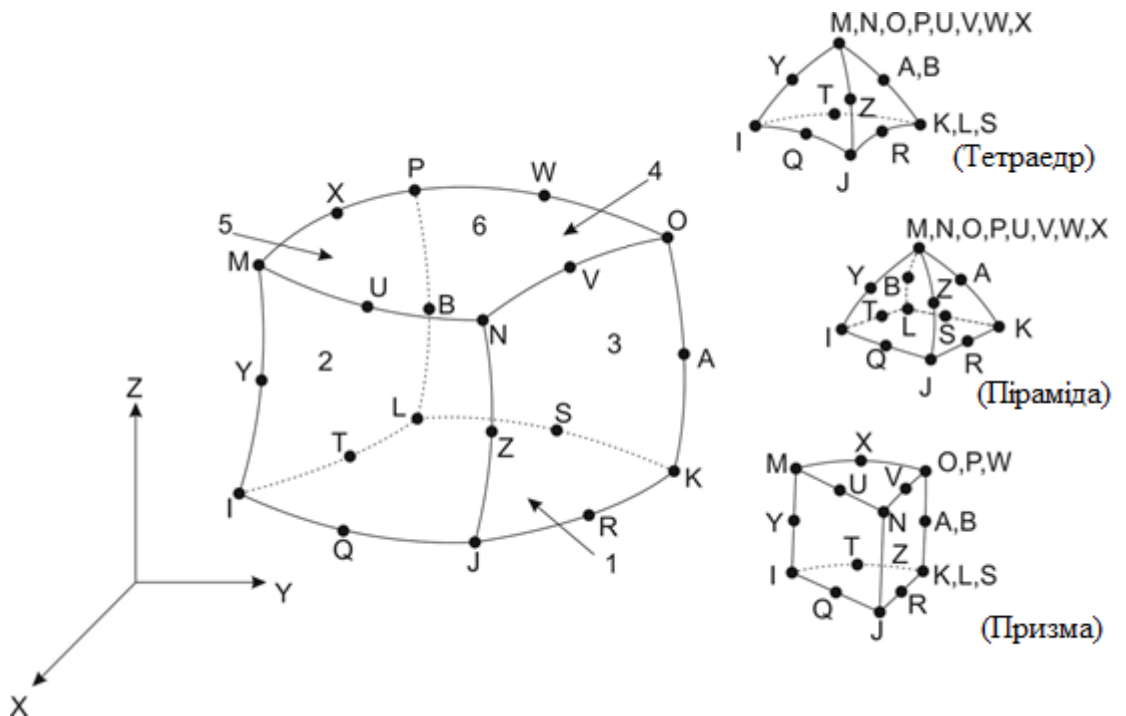


Рисунок 2.2 – Геометрія елемента SOLID122

Після зазначення типу кінцевого елемента необхідно вказати характеристики матеріалу, у разі застосування кремнію необхідно враховувати вплив кристалографічної орієнтації на модуль пружності.

Далі проводиться побудова об'єму моделі. Це може здійснюватися кількома способами.

Перший спосіб – створення точок, потім побудова ліній між точками, після чого будуються площини, які згодом утворюють об'єм. Цей підхід є трудомістким і довгим, і він не виключає помилок при створенні ліній, площин і об'ємів.

Другий спосіб – створення об'ємів з подальшим склеюванням об'ємів.

Цей метод заснований на створенні об'ємів за 6 точками - мінімальною і максимальною по кожній з координатних осей. Це дає змогу уникнути помилок під час створення об'ємів і отримати необхідні розміри. Недоліком цього методу є складність підбору розмірів кінцевих елементів, оскільки після операції "склеювання" об'єми так само залишаються окремими за своїми фізичними якостями, але для програмного комплексу є скріпленими.

Третій спосіб – створення об'ємів з подальшим відніманням об'ємів один від одного. У цьому підході спочатку створюється об'єм, який є максимальним за розмірами. Потім створюються об'єми, які будуть відняті з найбільшого об'єму. Таким чином, отримуємо математичну модель, яка є єдиним цілим, і при цьому будь-якої складної конфігурації. Перевагою цього підходу є можливість підбору універсального розміру кінцевого елемента, а також застосування логарифмічної зміни розміру кінцевого елемента вздовж лінії.

Варто зазначити, що програмний пакет ANSYS не підтримує роботу з розмірами менше  $10^{-6}$ . Таким чином, було ухвалено рішення проводити моделювання механічної підсистеми в системі мікроМКСА. Ця система вимірювань має спеціальну таблицю коефіцієнтів перетворення розмірностей МКС у систему мікроМКСА.

Після створення математичної моделі необхідно провести побудову сітки кінцевих елементів. Побудова сітки кінцевих елементів є нетривіальним

завданням за умови, що необхідно отримати високу точність результатів моделювання і водночас не допустити зниження швидкості моделювання.

### 2.1.2 Математична модель оптичної підсистеми МОЕМ акселерометра

Оптична підсистема, представлена у вигляді інтерферометра Фабрі-Перо, повинна забезпечувати коефіцієнт пропускання  $R$  не менше 75%,

Оптична підсистема мікрооптоелектромеханічного акселерометра представлена у вигляді інтерферометра Фабрі-Перо (рис. 2.3).

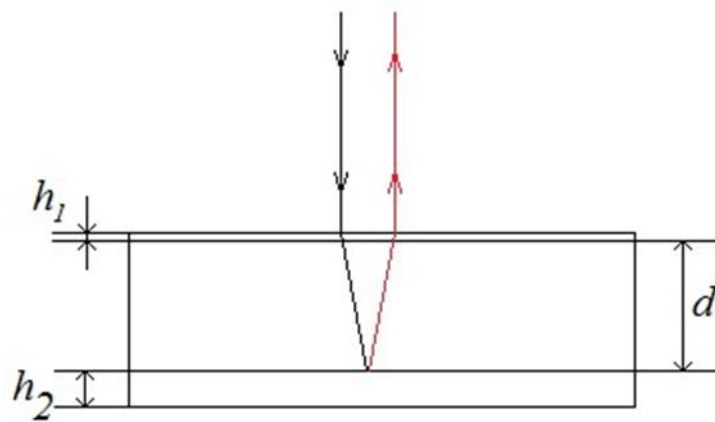


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення інтерферометра Фабрі-Перо мікрооптоелектромеханічного акселерометра

Оптична підсистема МОЕМ акселерометра безпосередньо пов'язана з механічною та електронною підсистемами. Під час виникнення прискорення відбувається відхилення рухомої маси механічної підсистеми на кут  $\alpha$ . При цьому в оптичній системі виникає ефект інтерференції, оскільки кут падіння променя відрізняється від  $90^\circ$ . На рисунку 2.4 наведено графік зміщення довжини хвилі падаючого променя світла в разі відхилення рухомої маси механічної підсистеми на кут  $\alpha$ .

Зміщення вершини відносно вихідної позначено як  $\Delta\lambda$ . Цей зсув фіксується фотодіодною матрицею електронної підсистеми і перетворюється на прискорення.

Моделювання оптичних систем із використанням геометричних матриць ґрунтується на тому, що кут між сусідніми променями має наближатися до нуля. Іншими словами, промені світла, що проходять, мають бути паралельні оптичній осі. Слід спростити тригонометричні функції, такі як  $\sin(\theta) \sim \theta$ , і  $\cos(\theta) \sim 1$ , для нескінченно малих значень  $\theta$ . Це наближення обґрунтоване застосуванням як джерела світла лазера, оскільки падаючий пучок світла є когерентним і відповідно кут між сусідніми променями наближається до нуля, що дає змогу використовувати прості операції над матрицями.

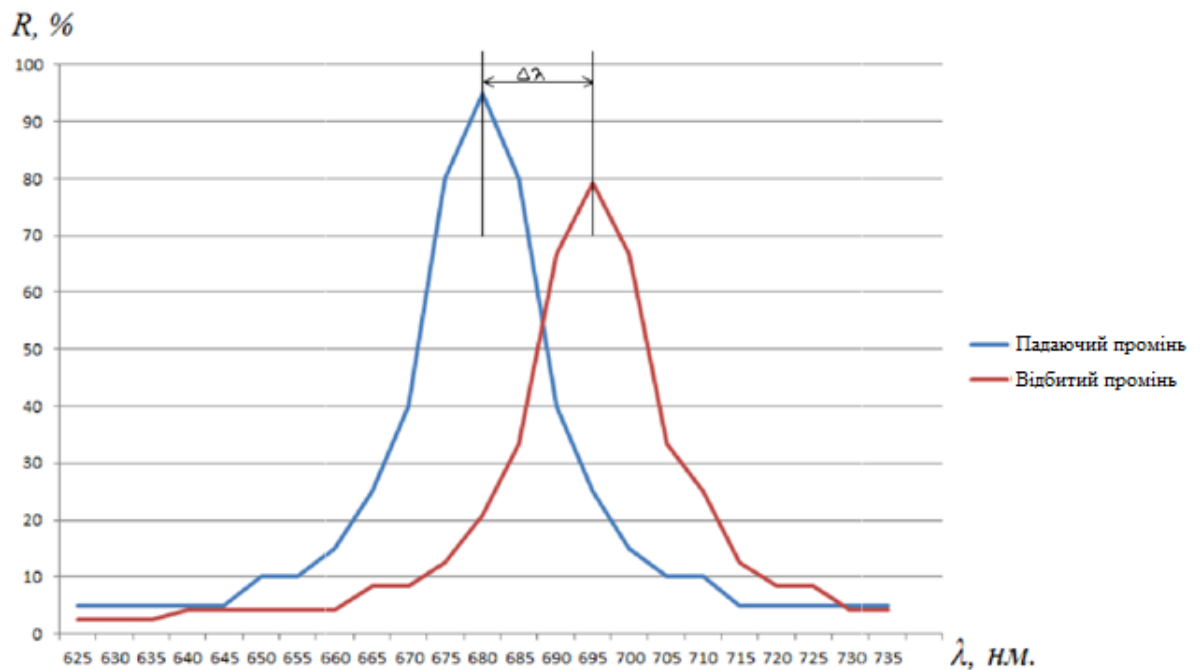


Рисунок 2.4 - Зсув спектра світлового пучка під час відхилення рухомої маси механічної підсистеми

Розглянемо випадок заломлення світлового променя, що проходить крізь оптичне середовище (рис. 2.5). Промінь пройшов відстань  $t_1$ , через середовище з показником заломлення  $n_1$ , починаючи з відстані  $h$  від оптичної осі та початковим кутом  $\theta$ . Таким чином, нову відстань від оптичної осі  $h_1$  і новий кут  $\theta_1$  можна обчислити, виходячи з такого матричного співвідношення:

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ h_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{t_1}{n_1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \theta \\ h \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

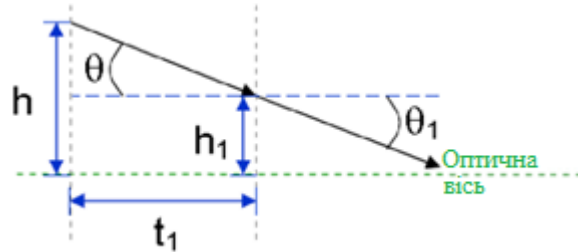


Рисунок 2.5 – Проходження світлового променя крізь заломлювальне середовище

Розглянемо випадок, коли промінь відбивається від поверхні матеріалу (рис. 2.6). У цьому разі, якщо промінь проходить через середовище з коефіцієнтом заломлення  $n_1$ , на відстані  $h$  від оптичної осі та кутом  $\theta$ , потім відбивається від поверхні з радіусом кривизни  $r_1$ , нова відстань  $h_1$  від оптичної осі та новий кут  $\theta_1$ , можна обчислити за таким матричним рівнянням:

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ h_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{n_1' - n_1}{r_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \theta \\ h \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

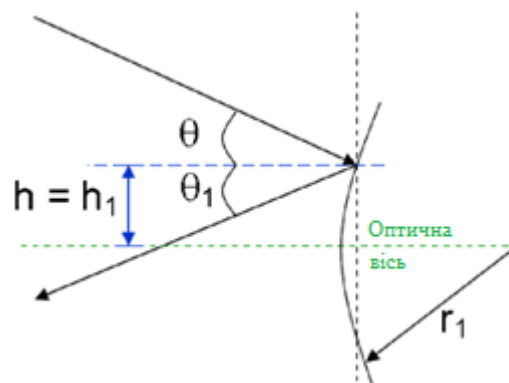


Рисунок 2.6 – Геометричне зображення відбитого променя

Використовуючи матричні рівняння можна описати поведінку променя в будь-якій точці інтерферометра. Повний опис оптичної підсистеми МОЕМ акселерометра на основі інтерферометр Фабрі-Перо за допомогою матричних рівнянь слід розбити на окремі випадки:

– падіння променя на поверхню і його заломлення напівпрозорою плівкою з алюмінію, товщиною  $\sim 10-20$  нм;

– заломлення скляною пластиною товщиною  $d = 1,6$  мкм, що заміщає повітряний зазор;

– відбиття від алюмінієвої плівки на протилежному боці скляної пластини;

– повторне заломлення променя на межі скло/алюмінієва плівка;

– заломлення променя на межі алюмінієва плівка/повітряне середовище.

У підсумковому вигляді матричне рівняння набуде такого вигляду (2.3):

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} 1 & \frac{n_2 - n_1}{r_2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{t_2}{n_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \frac{n_3 - n_2}{r_3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\
 & \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{t_3}{n_3} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \frac{n_1 - n_1'}{r_4} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{t_3}{n_3} & 1 \end{pmatrix} \times \\
 & \times \begin{pmatrix} 1 & \frac{n_2 - n_3}{r_2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{t_2}{n_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \frac{n_1 - n_2}{r_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \\
 & = \begin{pmatrix} BE + A \frac{t_2}{n_2} & BG + AF \\ BE + A \frac{t_2}{n_2} & DF + CG \end{pmatrix}, \tag{2.3} \\
 & A = \frac{(r_2 n_2 + t_2 (n_2 - n_1))(n_1 - n_1')}{r_2 r_4 n_2} + \\
 & + \frac{1}{r_3} \frac{(n_1 - n_1')((r_3 + t_2)n_2 - t_2 n_1)}{r_2 n_2} +
 \end{aligned}$$

$$+\frac{(t_2 n_3 + r_3 - t_2)(n_2 - n_1)}{r_2 r_4} + (n_3 - n_2), \quad (2.4)$$

$$B = \frac{r_2 n_2 + t_2 (n_2 - n_1)}{r_2 n_2} + A \frac{t_3}{n_3}, \quad (2.5)$$

$$C = \frac{t_2}{n_2} \left( \frac{2(n_1 - n_1')}{r_4} + \frac{n_3 - n_1}{r_3} \right), \quad (2.6)$$

$$D = \frac{t_2 t_3}{n_2 + n_3} C, \quad (2.7)$$

$$E = 1 + \frac{t_2 (n_2 - n_3)}{r_2 n_2}, \quad (2.8)$$

$$F = \frac{n_1 - n_2}{r_1} + \frac{(n_2 - n_3)((n_1 - n_2)t_2 + r_1 n_2)}{r_1 r_2 n_2}, \quad (2.9)$$

$$G = \frac{t_2}{n_2} + 1. \quad (2.10)$$

Щоб отримати новий кут і відстань від оптичної осі, достатньо розв'язати таке матричне рівняння:

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ h_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} BE + A \frac{t_2}{n_2} & BF + AG \\ DE + C \frac{t_2}{n_2} & DF + CG \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ h \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

Дане матричне рівняння (2.11) є основним для отримання інформації про вихідний промінь, після інтерференції на інтерферометрі Фабрі-Перо. На основі рівняння (2.11) будується математична модель оптичної підсистеми в програмному комплексі MATLAB/Simulink.

### 2.1.3 Математична модель електронної підсистеми МОЕМ акселерометра

Електронна підсистема повинна мати достатню швидкодію для перетворення зміни  $\Delta\lambda$  у лінійне прискорення. Основні вимоги до електронної підсистеми такі:

- фотодіодна матриця має забезпечувати діапазон вимірювань від 400 нм до 1100 нм, чутливість не менше ніж 8000 відліків/мкВт, кількість пікселів не менше ніж 2048, для точного оцінювання зміщення спектра світлового пучка;
- операційний підсилювач з високою швидкістю перетворень;
- АЦП з розрядністю не менше 12 біт;
- мікропроцесор із частотою не менше 160 МГц;
- буфер пам'яті з розрядністю не менше 10 біт;
- дисплей з можливістю відображення до 7 розрядів з можливістю підключення клавіатури для управління.

Вибір електронних компонентів здійснюється за комплексним показником якості.

Для отримання даних про вимірюване лінійне прискорення необхідна електронна підсистема. Електронна підсистема (рис. 2.7) складається з фотодіодної решітки Toshiba 3648x1 CCD-matrix, яка перетворює світловий пучок, що надходить, на електричні імпульси, операційного підсилювача AD8031AR, котрий підсилює перетворений сигнал, аналого-цифрового перетворювача AD7680ARMZ, котрий перетворює електричні імпульси, що надходять, на цифровий двійковий код, що надходить з аналого-цифрового перетворювача, і мікропроцесора Texas Instruments C5510, який перетворює інформацію та записує її в буфер SN74CBTD3861DBR, для подальшого виведення на дисплей LDM-310GK поточного значення лінійного прискорення, або передавання у вигляді цифрового сигналу загальній системі, яка керує пристроєм загалом і отримує інформацію з усіх датчиків. У разі якщо існує загальна керівна система, то відпадає необхідність застосування мікропроцесора для опрацювання сигналу та буфера для накопичення опрацьованого сигналу

(рис. 2.8), тоді повним опрацюванням сигналу займатиметься загальна керівна система.

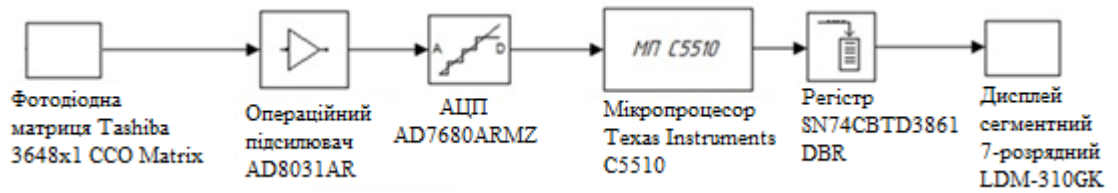


Рисунок 2.7 – Блок-схема електронної підсистеми

мікрооптоелектромеханічного акселерометра на основі інтерферометра Фабрі-Перо при виведенні на дисплей



Рисунок 2.8 – Блок-схема електронної підсистеми

мікрооптоелектромеханічного акселерометра на основі інтерферометра Фабрі-Перо за наявності спільної керуючої системи

Електронна підсистема повинна мати високу швидкодію, оскільки потрібні точні дані про величину лінійного прискорення. Таким чином, мікропроцесор повинен мати високу швидкодію, близько 100 МГц, для обробки сигналів, що надходять з АЦП. Одним із рішень може стати сигнальний процесор загального призначення фірми Texas Instruments C5510. Буфер має бути надшвидким для запису і читання інформації про величину лінійного прискорення.

Наведена блок-схема є спрощеною, оскільки під час використання світлового пучка, що містить повний світловий спектр, необхідно використовувати фотодіодну матрицю, що містить 3648 фотодіодів. Для перетворення в цифровий сигнал, обробки та зберігання необхідні значно більші обчислювальні ресурси. Таким чином, вибір певної області світлового спектра зменшує загальний розмір електронної системи, зменшує її вартість і збільшує швидкодію системи в цілому.

Для моделювання електронної підсистеми обрано програмний комплекс MATLAB з доповненням Simulink для моделювання електронних систем, зібраних на основі готових блоків.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ МОЕМС НА ПРИКЛАДІ МОЕМ АКСЕЛЕРОМЕТРА

У попередньому розділі розглянуто отримання математичних моделей механічної, оптичної та електронної підсистем. Як альтернативне рішення для механічної підсистеми розглянемо розподілений МОЕМ акселерометр на основі інтерферометра Фабрі-Перо.

У цьому розділі розглянуто багатомасштабне моделювання механічної підсистеми розподіленого мікрооптоелектромеханічного акселерометра на основі інтерферометра Фабрі-Перо.

#### 3.1 Математична модель механічної підсистеми розподіленого МОЕМ акселерометра

Розроблення конструкції розподіленого МОЕМ акселерометра на основі інтерферометра Фабрі-Перо тісно пов'язане з поняттям розподілених систем.

На рисунку 3.1 наведено геометричну модель конструкції розподіленого МОЕМ акселерометра на основі інтерферометра Фабрі-Перо.

Основні особливості цієї конструкції такі:

- контрольні (вимірювальні) елементи не зосереджені на одній рухомій масі, що збільшує відмовостійкість, але ускладнює технологічний процес виробництва подібної МОЕМ системи;
- необхідність урахування похибок обох вимірювальних елементів і виведення середньої зміни значення;
- збережено можливість застосування системного підходу.

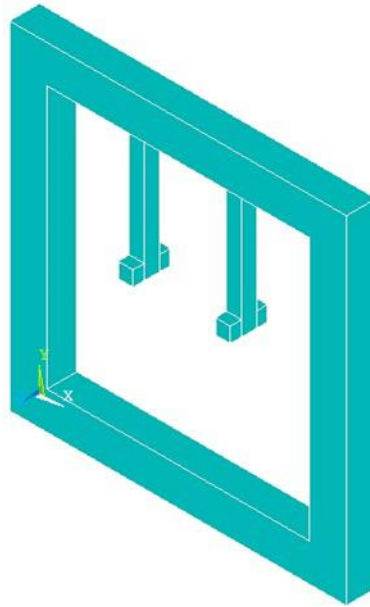


Рисунок 3.1 – Геометрична модель МОЕМ акселерометра на основі інтерферометра Фабрі-Перо

Кінцевий елемент, обраний для дослідження цієї моделі SOLID186, – це твердотільний елемент із 20 вузлами та 3 ступенями свободи.

На рисунку 3.2 наведено кінцево-елементну модель розподіленого МОЕМ акселерометра на основі інтерферометра Фабрі-Перо.

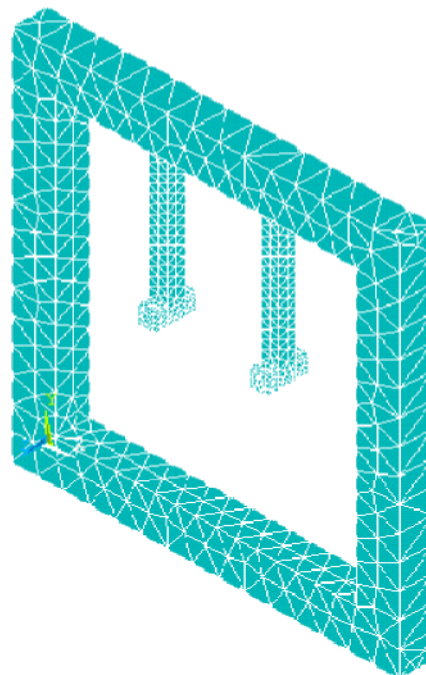


Рисунок 3.2 – КЕ модель розподіленого МОЕМ акселерометра на основі інтерферометра Фабрі-Перо

Далі наводиться приклад експериментального дослідження конструкції розподіленого МОЕМ акселерометра на основі інтерферометра в програмному комплексі ANSYS.

### 3.2 Розробка програмного модуля, що реалізує алгоритм отримання математичної моделі механічної підсистеми МОЕМ акселерометра

Програмний комплекс ANSYS надає можливість розроблення модулів для вбудовування в панелі інструментів або часткової чи повної заміни наявних функцій, окрім критично важливих, на вбудованій мові програмування APDL, яка є логічним розвитком мови FORTRAN.

Основна концепція роботи модуля – параметризація процесу створення механічної підсистеми мікрооптоелектромеханічного акселерометра. Це досягається за рахунок введення спеціальних діалогових вікон типу 'ASK' для отримання параметрів математичної моделі, таких як габаритні розміри, властивості матеріалу тощо. На рисунку 3.3 наведено діалогове вікно 'ASK'.

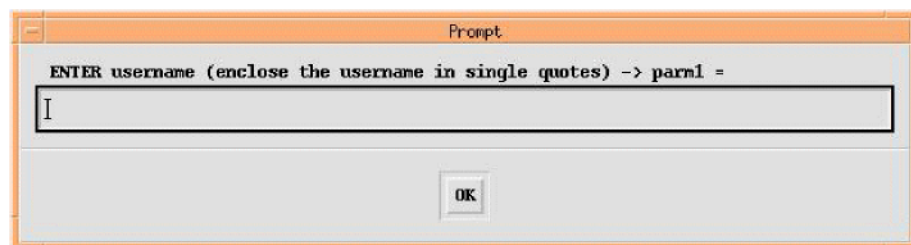


Рисунок 3.3 – Діалогове вікно 'ASK'

Діалогове вікно 'ASK' застосовується для запиту одиночних параметрів. У нашому випадку раціонально застосувати пакетний запит параметрів. На рисунку 3.4 наведено фрагмент коду, що запитує кілька параметрів створюваної моделі в одному вікні.

```

multipro,'start',3
*cset,1,3,dx_m,'Введіть розмір X рухомої маси',0.0
*cset,4,6,dy_m,' Введіть розмір Y рухомої маси ',0.0
*cset,7,9,dz_m,' Введіть розмір Z рухомої маси ',0.0
*cset,10,12,dx_f,' Введіть розмір X інтерферометра',0.0
*cset,13,15,dy_f,' Введіть розмір Y інтерферометра',0.0
*cset,16,18,dz_f,' Введіть розмір Z інтерферометра',0.0
multipro,'end'

```

Рисунок 3.4 – Фрагмент коду з пакетним запитом параметрів

З рисунку 3.4 видно, що отримані розміри математичної моделі та розміри інтерферометра запам'ятовуються у відповідні змінні, у разі, якщо одну зі змінних не буде задано, їй присвоїть значення, близьке до нуля, автоматично.

Наступний крок – призначення кінцевих елементів і задання параметрів матеріалу. Оскільки модуль є виконуваним сценарієм, то в коді модуля допускається застосування стандартних команд призначення кінцевих елементів тощо. ('ET,1,solid45', 'ET,2,solid122') Як кінцеві елементи призначаємо SOLID45 для механічних навантажень і SOLID122 для електростатичних розрахунків.

Після визначення KE слідує етап побудови математичної моделі. Цей етап так само описується стандартними командами побудови об'ємів. Слід зазначити, що для побудови математичної моделі механічної підсистеми використано метод віднімання об'ємів. Об'єми створюються командою "BLOCK,x1,x2,y1,y2,z1,z2", де x1,x2 - координати мінімальної та максимальної точок за віссю x; y1,y2 - за віссю у відповідно; z1,z2 - за віссю z.

Далі сценарій автоматично здійснює побудову грубої сітки кінцевих елементів за допомогою команди VMESH, а потім прикладає навантаження по всій площині рухомої маси у вигляді прискорення за віссю z. Далі проводиться накладення обмежень на рухому масу, оскільки вона являє собою закладення в рамці корпусу, відповідно, на вузли початку рухомої маси накладаються обмеження переміщення і обертання.

На наступному етапі проводиться "швидке" моделювання з урахуванням прикладеного навантаження. За результатами "швидкого" моделювання

командною \*GET, M\_1, V1, ELEM, COMPSTRS, VOLU проводиться отримання матриці напружень для об'єму. Слід врахувати, що матриця є двовимірною, де кожен стовпчик визначає значення деформації певного типу X, Y, Z, dX, dY, dZ тощо. Далі найпростішим циклом 'FOR' проводиться отримання середнього арифметичного значення деформації для визначення середньої межі, на підставі якої буде здійснюватися відбір вузлів мінімальної та максимальної деформації.

Після отримання середнього арифметичного значення деформації, оголошуються та ініціалізуються дві матриці, що містять у собі номери вузлів, які мають максимальну або мінімальну деформацію, відносно знайденого середнього арифметичного.

На основі отриманої інформації здійснюється перебір вузлів максимальної деформації, їх виділення командою 'PICK' і подальша зміна щільності кінцевих елементів і розмірів кінцевих елементів покроково, аж до наближення до межі мінімальних розмірів кінцевих елементів. Слід зазначити, що кількість КЕ в кінцево-елементній моделі, після кожного кроку, перевіряється. Якщо кількість перевищить 32665 елементів, то відбувається повернення до попереднього кроку та розмірів і щільності КЕ і вихід з ітераційного циклу підбору розмірів і щільності КЕ.

Далі, відповідно до методики проведення математичного моделювання механічної підсистеми, проводиться моделювання КЕ моделі з модифікованою сіткою КЕ та отримання власних частот із відповідної матриці.

Потім проводиться розрахунок електростатичної частини математичної моделі для отримання опису поведінки математичної моделі мовою VHDL-AMS. Файли опису створюються і зберігаються автоматично в робочій директорії ANSYS, заданій за замовчуванням.

На кожному етапі проводяться перевірки певних параметрів і значень для запобігання помилок, які можуть виникнути під час проведення кожного етапу математичного моделювання вручну.

## ВИСНОВКИ

Математичне моделювання є невід'ємною частиною маршруту автоматизації системного проектування МОЕМС. З огляду на вимоги до методів моделювання, не всі методи вважаються адекватними при проведенні математичного моделювання механічної підсистеми.

Програмним комплексом, що дозволяє проводити математичне моделювання механічної підсистеми є ANSYS. Основним засобом для моделювання оптичної та електронної підсистем є Matlab з доповненням Simulink.

Аналіз стану галузі математичного моделювання дозволяє зробити такі висновки:

- математичне моделювання систем, що ґрунтуються на поєднанні різних фізичних ефектів, є міждисциплінарним завданням;
- математичне моделювання складних МОЕМС є ресурсомістким завданням щодо обчислювальних ресурсів;
- існують обмеження на розрахунок створюваних математичних моделей на основі кінцевих елементів, які не дозволяють проводити моделювання структур певних розмірів;
- створювані математичні моделі складних систем який завжди є адекватними стосовно створюваним системам.
- програмні продукти неможливо проводити моделювання складних МОЕМС систем у межах одного програмного комплексу;
- обмеженість кола розв'язуваних завдань різними програмними комплексами.

Однією з провідних тенденцій став «інтернет речей», а також перспективи створення та застосування компактних енергозберігаючих вимірювальних модулів, які можуть бути зв'язані в єдину мережу вимірювання, обмінюючись даними за допомогою RFID-міток.

У результаті виконаних досліджень з математичного моделювання підсистем мікрооптоелектромеханічного акселерометра на основі інтерферометра Фабрі-Перо отримано математичні моделі механічної, оптичної та електронної підсистем, а також математичну модель МОЕМ системи. Математична модель механічної підсистеми отримана шляхом розв'язання СЛАР за допомогою МКЕ. Результатом математичного моделювання механічної підсистеми стало отримання опису мовою формального опису VHDL-AMS; застосування матричних рівнянь для отримання математичної моделі на етапі математичного моделювання оптичної підсистеми; математичне моделювання електронної підсистеми з обґрунтуванням вибору компонентів за комплексним показником якості. Електронну підсистему описано за допомогою передавальних функцій, які є блоками для побудови математичної моделі на етапі структурного синтезу в програмному комплексі MATLAB/Simulink.

Реалізовано модуль, що дає змогу автоматизувати процес отримання математичної моделі механічної підсистеми, для програмного комплексу ANSYS, який дає змогу отримувати опис поведінки механічної підсистеми мовою VHDL-AMS.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бондаренко І.М., Глухов О.В., Кравчук О.О. Електронні системи: Навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 219с.
2. A. Ferreira and S. S. Aphale, "A Survey of Modeling and Control Techniques for Micro- and Nanoelectromechanical Systems," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 41, no. 3, pp. 350-364, May 2011.
3. Joachim N. Burghartz, "Microelectromechanical Systems (MEMS)," in Guide to State-of-the-Art Electron Devices , IEEE, 2013, pp.239-250
4. Яворський Н., Теслюк В., Литвинова Є. Комп'ютерні методи в інженерії мікроелектромеханічних систем (Computer Methods in Microsystems Engineering). – Львів: Львівська політехніка, 2015 – 280 с.
5. Філяшкін М.К. Мікроелектромеханічні системи: Навчальний посібник – К.: НАУ, 2019. – 276 с.
6. Гераїмчук М., Івахів О., Репетило Т. Основи проектування МЕМС перетворювачів механічних величин в електричні. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017 – 108 с
7. Теслюк В.М., Денисюк П.Ю. Автоматизація проектування мікроелектромеханічних систем на компонентному рівні. Львіві: НУЛП, 2011.
8. Senturia S. S. D. Microsystem Design. – 2001. – 720 с.
9. Viola, C., Pavesi, D., Weng, L., Gobat, G., Maspero, F., & Zega, V. (2024). Microelectromechanical System Resonant Devices: A Guide for Design, Modeling and Testing. *Micromachines*, 15(12), 1461.
10. Liu, Y., Ping, M., Han, J., Cheng, X., Qin, H., & Wang, W. (2024). Neural Network Methods in the Development of MEMS Sensors. *Micromachines*, 15(11), 1368.
11. Chuang, W. -C., Lee, H. -L., Chang, P. -Z., & Hu, Y. -C. (2010). Review on the Modeling of Electrostatic MEMS. *Sensors*, 10(6), 6149-6171.

12. B. Zhang and M. T. E. Kahn, "Overview and improving fiber optic gyroscope based on MEMS/NEMS fabrication", Proc. Int. MEMS Conf., vol. 34, pp. 148-154, 2006.
13. T. Bechtold, E. B. Rudnyi and J. G. Korvink, "Automatic order reduction of thermo-electric models for MEMS: Arnoldi versus Guyan", Proc. 4th Int. Conf. Adv. Semicond. Devices Microsyst., vol. 3, pp. 333-336, Oct. 2002.
14. J. S. Han, E. B. Rudnyi and J. G. Korvink, "Efficient optimization of transient dynamic problems in MEMS devices using model order reduction", J. Dyn. Syst. Meas. Control, vol. 15, pp. 822-832, 2005.
15. C. Chen and C. Lee, "Design and modeling for comb drive actuator with enlarged static displacement", Sens. Actuators A, vol. 115, pp. 530-539, 2004.
16. V. Kolchuzhin, J. E. Mehner, T. Gessner and W. Doetzel, "Parametric finite element analysis for reduced order modeling of MEMS", Proc. Int. Conf. Therm. Mech. Multi-Phys. Simul. Exp. Microelectron. Micro-Syst., pp. 1-6, Apr. 2008.
17. S. De and N. Aluru, "Physical and reduced-order dynamic analysis of MEMS", Proc. Int. Conf. Comput. Aided Design, pp. 270-273, Nov. 2003.
18. G. Lorenz, A. Morris and I. Lakkis, "A top-down design flow for moems", Proc. IEEE Int. Conf. Micro-Electro-Mech. Syst., pp. 204-209, Jan. 20--24, 2002.
19. K. Esfarjani and G. A. Mansoori, "Statistical mechanical modeling and its application to nanosystems", Handbook Theor. Comput. Nanotechnol., vol. 1, pp. 1-45, 2005.