

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Імітаційна модель проектування інерційного MEMC-сенсора
з використанням пакету Matlab/Simulink

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СКСм-22-2
Міщенко В.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Спеціалізовані
комп'ютерні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Ларченко Л.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри АПОТ


(підпис)


Чумаченко С.В.
(прізвище, ініціали)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри 
(підпис)

“ ” 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові Міщенко Владиславу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Імітаційна модель проектування інерційного МЕМС-сенсора з використанням пакету Matlab/Simulink

затверджена наказом по університету від " 03 " 11 2023 р. № 1282 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 19.01.2024

3. Вихідні дані до роботи

Математичний процесор MATLAB

Програмний пакет Simulink

Бібліотека Matlab/Simulink/Simscape

МЕМС-акселерометр ADXL325

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1 Аналіз сучасного стану мікроелектромеханічних систем

2 Особливості проектування та технологій виготовлення МЕМС

3 Аналіз конструкції, розробка математичної моделі МЕМС-акселерометра

4. Розробка імітаційної Simulink-моделі механічного компонента МЕМС-акселерометра

5. Поведінкове моделювання в середовищі Matlab/Simulink.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 18 слайдів


6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)


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	Отримання завдання	01.09.2023 - 02.09.2023	
2	Аналіз предметної області	03.09.2023 - 10.09.2023	
3	Аналіз джерел з проблемної галузі	11.09.2023 - 24.09.2023	
4	Огляд особливостей проектування та виготовлення МЕМС, аналіз вбудованої схеми системи	25.09.2023 - 09.10.2023	
5	Аналіз конструкції, розробка рівняння динаміки та електричної моделі акселерометра	10.10.2023 - 18.10.2023	
6	Розробка Simulink-моделі механічної системи акселерометра	19.10.2023 - 27.10.2023	
7	Розробка імітаційної Simulink-моделі механічного компонента ємнісного МЕМС-акселерометра	28.10.2023 - 15.11.2023	
8	Моделювання в середовищі Matlab/Simulink	16.11.2023 - 30.11.2023	
9	Оформлення пояснювальної записки	01.12.2023 - 14.12.2023	
10	Оформлення графічного матеріалу	15.12.2023 - 24.12.2023	
11	Перевірка виконаного проекту керівником	25.12.2023 - 05.01.2024	

Дата видачі завдання 01 вересня 2023 р.

Студент 
(підпис)

Керівник роботи  доц. Ларченко Л.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 68 сторінок 41 рисунків, 14 джерел за переліком посилань.

МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, ІНЕРЦІЙНИЙ МЕМС-СЕНСОР, АКСЕЛЕРОМЕТР, ПРИСКОРЕННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, MATLAB SIMULINK, SIMULINK-МОДЕЛЬ

В кваліфікаційній роботі проаналізовано сучасний стан МЕМС, динаміку ринку інерційних МЕМС-сенсорів, проаналізовано особливості проектування і виготовлення МЕМС, розглянуто класифікацію та типи сучасних акселерометрів. Об'єктом є МЕМС-акселерометри в рухомих об'єктах. Предметом дослідження - моделі мікромеханічних МЕМС-акселерометрів в Matlab/Simulink.

Розглянуто конструкцію та принцип роботи акселерометра, отримано рівняння динаміки львового МЕМС-акселерометра, розроблено електричну модель ємнісного МЕМС-акселерометра.

За допомогою процедур моделювання розроблено Simulink-модель механічної системи акселерометра. Імітаційна модель механічного компонента ємнісного МЕМС-акселерометра була розроблена з використанням пакету Matlab/Simulink. На основі розробленої моделі проведено поведінкове моделювання чутливого елемента МЕМС-акселерометра, отримано графіки залежностей, що підтверджують отримані математичні моделі акселерометра.

ABSTRACT

The explanatory note contains 68 pages, 41 figures, 14 sources by the list of references

MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, INERTIAL MEMS-SENSOR, ACCELEROMETER, ACCELERATION, MATHEMATICAL MODELING, MATLAB SIMULINK, SIMULINK-MODEL

The qualification paper analyzed the current state of MEMS, the market dynamics of inertial MEMS sensors, analyzed the features of MEMS design and manufacture, considered the classification and types of modern accelerometers. The object of the study is accelerometers in moving objects. The subjects of the study are micromechanical accelerometers models in the Matlab/Simulink environment.

The design and principle of operation of the accelerometer were considered, the equations of the dynamics of the linear accelerometer were obtained, and the mathematical model of the capacitive MEMS accelerometer was developed. The simulation model of the mechanical component of capacitive MEMS accelerometer was developed using the Matlab/Simulink package.

On the basis of the developed model, behavioral modeling of the sensitive element of the MEMS-accelerometer was carried out, graphs of dependencies were obtained, which confirm the obtained mathematical models of the accelerometer.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ.....	10
1.1 Огляд динаміки ринку інерційних МЕМС-сенсорів та галузі їх використання.....	10
1.2 Особливості проектування та виготовлення МЕМС.....	14
1.3 Призначення та класифікація МЕМС-сенсорів.....	18
1.4 Класифікація МЕМС-акселерометрів.....	20
1.5 Постановка завдання дослідження.....	22
2 КОНСТРУКЦІЯ ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МЕМС- АКСЕЛЕРОМЕТРА.....	24
2.1 Типи мікромеханічних МЕМС-сенсорів лінійних прискорень.....	24
2.2 Механічна схема та рівняння динаміки МЕМС-акселерометра....	33
2.3 Математична модель емнісного МЕМС-акселерометра.....	39
3 МОДЕЛЮВАННЯ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА.....	44
3.1 Проектування МЕМС-пристроїв з використанням засобів САПР.....	44
3.2 Програмний пакет Matlab/Simulink для моделювання систем.....	46
3.3 Simulink-модель механічної системи МЕМС-акселерометра.....	50
3.4 Simulink-модель сенсорного елемента МЕМС-акселерометра.....	54
3.5 Імітаційна Simulink-модель механічного компонента МЕМС- акселерометра та результати поведінкового моделювання.....	58
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	67
ДОДАТОК А Графічна частина кваліфікаційної роботи.....	69

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ANSYS – універсальна програмна система кінцево-елементного аналізу

BC – вбудована система

IC – інтегральна схема

IoT (Internet of Things) – Інтернет речей

MEMS (Microelectromechanical systems) – мікроелектромеханічні системи

MST – мікросистемна техніка

САПР – система автоматизації проектування

ТЗ – технічне завдання

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ANSYS – програмний пакет кінцево-елементного аналізу

INS – інерціальна навігаційна система

Matlab/Simulink – програмне забезпечення для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем

SCP (Single Chip Package) – однокристальний інтегральний модуль

SoC (System-on-a-Chip) – система на кристалі

Solid Works – програмний комплекс САПР для автоматизації робіт промислового підприємства

ВСТУП

Одним з науково-технічних напрямів, що стрімко розвиваються на мікрорівні, є мікросистемна техніка (МСТ) і мікроелектромеханічні системи (МЕМС), які створюються на основі мікросистемної техніки. МЕМС являють собою інтегровані пристрої, які виконані за допомогою технології, що поєднують у собі технології виготовлення інтегральних мікросхем і мікрообробки.

На даний момент світовий ринок МЕМС-пристроїв і надалі динамічно зростає. Стрімко збільшується виробництво та номенклатура компонентів МЕМС, зокрема сенсорів та актюаторів, які мають значну комерційну привабливість. МЕМС-пристрої представляють собою системи, які є мікромініатюрними і інформаційно-керуючими, об'єднують в собі сенсори, актюатори та електронні компоненти, що забезпечують багатофункціональність, інтелектуальність, високу технологічність і повторюваність, чутливість, точність, надійність, низьке енергоспоживання, низьку вартість, враховуючи групові технології виробництва МЕМС. Значною мірою розвивається елементна база МЕМС внаслідок розробки та впровадження нових матеріалів, технологій виготовлення, принципів роботи сенсорів та актюаторів. Основними перевагами МЕМС є надширока область використання.

Створення МЕМС-сенсорів є революційним в сучасних інерційних технологіях. Акселерометри на основі MEMS є одними з найбільш часто використовуваних сенсорів. MEMS-акселерометри відносяться до інерційних компонентів МЕМС та є складними компонентами МСТ, які включають у собі механічну та електричну складові. Провідними виробниками МЕМС акселерометрів є фірми Analog Devices, STMicroelectronics, Colibrus, Freescale Semiconductor, VGelectronics. Використання МЕМС-акселерометрів є надзвичайно широким і вони знаходять застосування в різних галузях:

системах навігації літальних апаратів, автомобілебудуванні, робототехніці, промислових системах контролю вібрації, в системах віртуальної реальності; смартфонах, ноутбуках.

Процес проектування і аналіз результатів поведінкового моделювання компонентів МЕМС передбачає широке використання сучасних засобів автоматизованого проектування, у тому числі і програмного пакету Matlab. Matlab/Simulink дозволяє створювати моделі динамічних об'єктів і сприяти скороченню часу проектування та підвищенню якості створення певних моделей і моделювання визначених процесів.

В кваліфікаційній роботі представлено математичні моделі МЕМС-акселерометра. Приведено процедури моделювання Simulink-моделі МЕМС-акселеромета з використанням Matlab/Simulink. Приведено результати поведінкового моделювання Simulink-моделі механічного компонента МЕМС-акселерометра в середовищі Matlab/Simulink.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

У даному розділі проведено аналіз динаміки ринку МЕМС-пристроїв і сенсорів та галузі їх використання, розглянуто структуру вбудованої системи, особливості технологій виготовлення МЕМС, класифікації сенсорів та МЕМС-акселерометрів, сформульовано мету і завдання дослідження.

1.1 Огляд динаміки ринку МЕМС-сенсорів та галузі їх використання

З останні роки промисловість мікросистемної техніки відзначилася вражаючим зростанням завдяки просуванню інтеграційних процесів. МЕМС застосовуються у широкому спектрі галузей, призначених для масового та серійного виробництва, а отже, у військовій техніці, авіації, робототехніці, автомобілебудуванні, побутовій електроніці, медичному обладнанні, біотехнологіях, у приладах збирання енергії і мікроелементах живлення, в якості аналітичних мікролабораторій, що виконані на одному кристалі.

На даний час світовий ринок МЕМС-пристроїв дуже стрімко прогресує, а також динамічно змінюється. По мірі розвитку і впровадження «Інтернету речей» (IoT) необхідність у МЕМС-пристроях набагато зростає, також ростуть обсяги ринку МЕМС у галузі споживчих пристроїв [1].

Обсяг ринку МЕМС-пристроїв щороку збільшується приблизно на 16-18%. За останні 2 роки динаміка зростання знизилась внаслідок процесів, що відбуваються у світі, але з точки зору довгострокового зростання тенденція росту зберігається і має місце стійке зростання з \$12,1 млрд. (2020 рік) до \$18,2 млрд. (2026 рік), що становить 7,2% згідно дослідженням консалтингової компанії Yole Development (рис.1.1). При цьому спостерігається динаміка подальшого зростання виробництва існуючих та новітніх розробок МЕМС-пристроїв, зокрема мікросенсорів тиску,

акселерометрів, гіроскопів, RF та оптичних MEMC, мікродозаторів рідини, мікроструйних MEMC, ДНК-чипів та інших пристроїв. MEMC-пристрої складають 30% від загальної вартості ринку сенсорів та актюаторів. Зокрема, системи доповненої та віртуальної реальності та зв'язок 5G та робототехнічні системи широко використовують MEMC-пристрої.

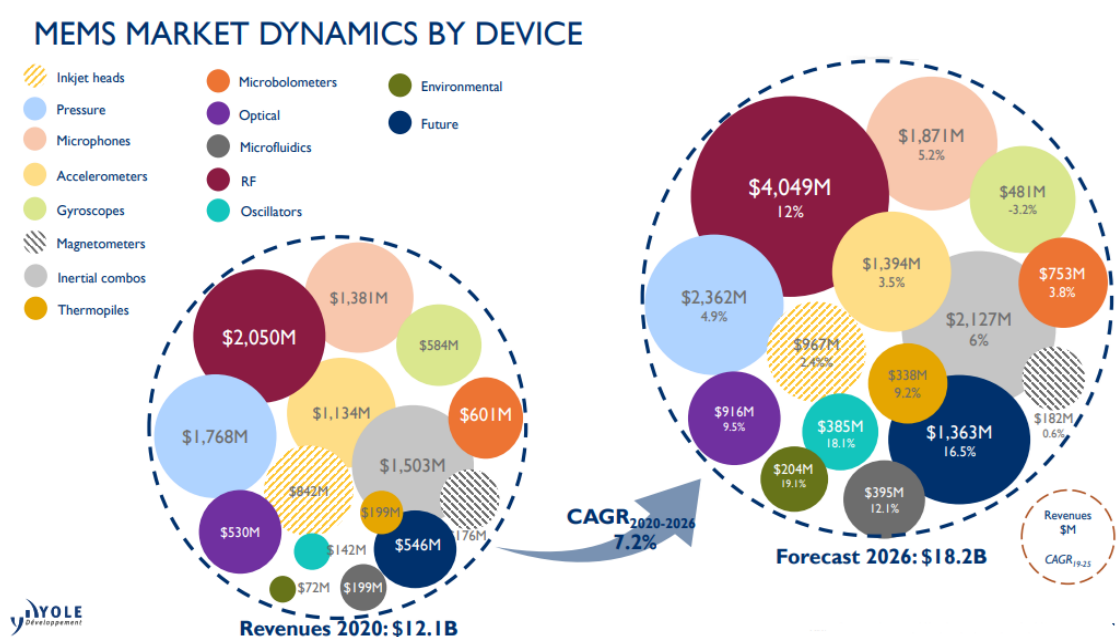


Рисунок 1.1 – Динаміка світового ринку MEMC-пристроїв

На рис. 1.2 представлений огляд динаміки ринку інерційних MEMC-сенсорів для військової, аерокосмічної сфер, автомобілебудування та споживчої сфер. За оцінками, ринок інерційних MEMC-сенсорів з 2021 року до 2027 року збільшиться з \$3,1 млрд. досягне \$4,5 млрд, що складає 6,5% сукупного середньорічного темпу зростання [2].

Значну кількість MEMC-сенсорів складають інерційні сенсори - акселерометри та гіроскопи. Протягом останніх 10 років інерційні MEMC-сенсори продемонстрували більші показники стабільності, шуму та повторюваності. Виробники споживчих і автомобільних систем широко використовують інерційні сенсори. Промислові, аерокосмічні та оборонні

ринки також використовують інерційні аналогові та цифрові MEMS-акселерометри та гіроскопи [3].

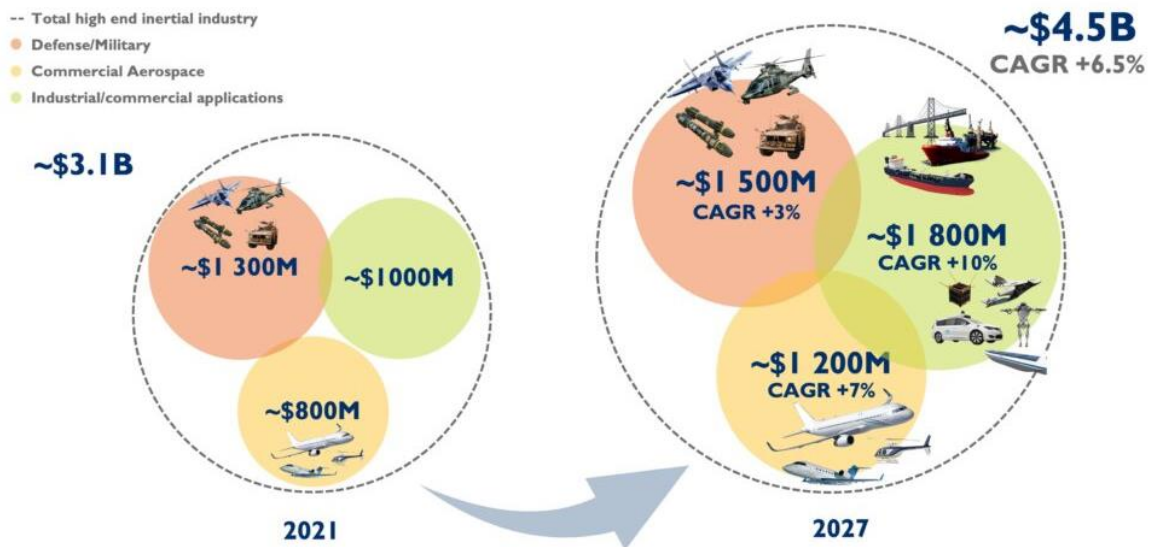


Рисунок 1.2 – Динамика ринку інерційних MEMS-сенсорів для сфер промисловості

Інерційні MEMS-сенсори, такі як акселерометри, гіроскопи забезпечують високу продуктивність, низьку потужність і низьку вартість та в даний час вбудовані в більшість споживчих програм. Акселерометри на основі MEMS є одними з найбільш часто використовуваних сенсорів та мають різні сфери застосування, використовуються в літальних апаратах, автомобілях, судах, подушках безпеки, смартфонах, та інших об'єктах.

Гіроскоп та акселерометр використовуються в інерціальних навігаційних системах (INS) для визначення таких параметрів транспортного засобу, як положення, орієнтація та швидкість. INS використовуються в поєднанні з глобальними системами позиціонування (GPS) для підвищення точності.

На даний час більшість обчислювальних систем є вбудованими системами (BC), що представляють собою спеціалізовані обчислювальні системи, які здійснюють взаємодію з фізичними об'єктами або процесами.

Світовий ринок ВС постійно розвивається і зростає, про що свідчать дослідження, які проводять консалтингові компанії, з кожним роком ВС стають складнішими і потребують збільшення надійності.

MEMC являють собою інтегровані інформаційно-керуючі системи. Сукупність мікроелектронних функціональних і керуючих елементів в одному конструктивному виконанні є мікросистемою. Мікросистеми містять у своєму складі сенсори, в яких є первинні чутливі елементи, що перетворюють фізичні параметри середовища в електричні сигнали, засоби обробки сигналів і виконавчі елементи (актюатори), що являють собою пристрої певної дії в залежності від області застосування. Сенсори, засоби обробки і актюатори пристроїв MEMC поєднані на єдиній кремнієвій основі. Структура вбудованої системи приведена на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Структура вбудованої мікросистеми

MEMC-енсори сприймають інформаційні сигнали з зовнішнього середовища за допомогою вимірювання різних фізичних явищ, а отже, механічних, теплових, оптичних, магнітних та біологічних та інших явищ. Сигнали перетворюють в електричні сигнали за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) та допоміжні компоненти перетворення. Надалі перетворені сигнали, отримані від сенсорів, обробляються за допомогою мікропроцесорних засобів (процесорів, мікроконтролерів та інших засобів обробки), вони обробляють отриманий цифровий сигнал згідно заданому алгоритму. Після мікропроцесорної обробки керуючі сигнали подаються на інтерфейсні компоненти перетворення, в які входить цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) і далі на виконавчі пристрої: актюатори, пристрої

приведення в рух механізмів Мікроктюатори забезпечують різну роботу, зокрема, переміщення, регулювання, позиціонування та інші дії.

Сьогодні спостерігається тенденція подальшого розвитку, створення і впровадження у ВС інтелектуальних сенсорів, які включають сенсорний компонент, схему аналогового інтерфейсу, АЦП, які вбудовані в єдиний корпус. На відміну від базового сенсора інтелектуальний сенсор включає широкий спектр функцій: самоідентифікацію, самотестування та інші функції. Інтелектуальні online-сенсори на сьогоднішній день є основним компонентом MEMS, які можуть самі впливати на об'єкт дослідження. Найбільшими користувачами подібних сенсорів є галузі транспортних засобів, однак вони можуть застосовуватись практично у всіх сферах використання.

1.2 Особливості проектування та виготовлення MEMS

Технологія виготовлення мікроелектромеханічних систем розвивається на базі науково-технологічного прогресу мікроелектроніки і використовує технології, які мають назву групових прецизійних технологій. Існують певні специфічні особливості технологій виготовлення MEMS-пристроїв.

У порівнянні з виробами мікроелектронних пристроїв, які є планарними, тобто двовимірними інтегральними пристроями та механічно статичними, виробы MEMS-пристроїв являють собою тривимірні конструкції, в яких певні окремі компоненти потребують свободи до механічних переміщень у просторі. Ці властивості вимагають подальшого розвитку нових технологічних операцій, що мають забезпечувати тривимірне формоутворення структур [4].

Технології виготовлення MEMS мають певні особливості, такі як мініатюризація, що передбачає виготовлення прецизійних унікальних виробів з мініатюрними розмірами елементів. Розміри і взаємне розташування елементів виконуються із субмікронною точністю. Другою особливістю є множинність – велика кількість виробів, при виготовленні

яких здійснюється одночасне оброблення тисяч або, навіть, мільонів компонентів на одному кристалі, внаслідок чого МЕМС-пристрої є відносно дешевими і доступними для масового використання.

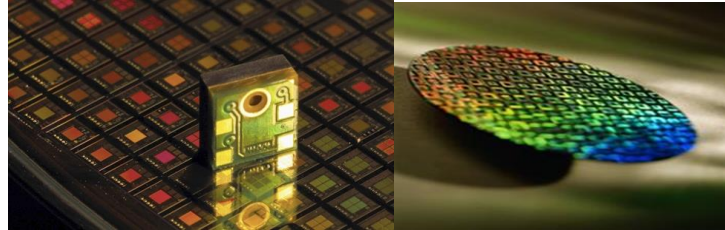


Рисунок 1.4 – Напівпровідникова пластина зі сформованим масивом мікросхем

Мікроелектроніка дозволяє здійснювати монолітне виконання механічних компонентів МЕМС (сенсорів, актюаторів), забезпечуючи інтеграцію механічних підсистем з електронними засобами обробки сигналів.

При проектуванні МЕМС-пристроїв необхідно вирішувати складні завдання. Вони пов'язані з необхідністю моделювання та вирішення завдань схемотехніки, логіки функціонування пристрою. Крім того, вирішуються паралельні завдання, пов'язані з механікою твердого тіла, гідродинамікою та іншими галузями.

Кожен виріб МЕМС проходить етапи проектування та виготовлення. Перший етап – це розробка виробу, що включає стадію проектування, яке передбачає аналітичне математичне моделювання за допомогою пакетів прикладних програм, тобто ANSYS, Solid Works, Matlab та комп'ютерне моделювання, яке передбачає використання програмних продуктів (Mentor Graphics). Другим етапом є виготовлення МЕМС, що являє собою кристалне продукування мікроелементів та мікросхем, а також збірка модулів систем. Третій етап включає тестування та випробування, наприклад, температурне, кліматичне. Четвертий етап передбачає вихідний контроль виробу з остаточним тестуванням. Для виготовлення МЕМС-пристроїв

використовується пакетна обробка, що має великий обсяг ІС. При цьому має місце додавання або віднімання двовимірних шарів на підкладці кремнію з використанням фотолітографії і хімічного травлення. В результаті створюється тривимірні МЕМС-вироби, які обумовлені шаблонізацією.

Розглядаючи технології виготовлення мікросистем виділяють дві основні групи матеріалів. До першої групи входять конструкційні або композиційні матеріали. Основним конструкційним матеріалом для виготовлення МЕМС-пристроїв є монокристалічний кремній[5, 6]. На даний час використовуються і інші матеріали: скло, пластик, кераміка, вольфрам, золото, мідь, алмазоподібний вуглець тощо. Ці матеріали застосовують у МЕМС для формування конструкцій опор і механічних рухомих частин. Другу групу матеріалів представляють активні - «інтелектуальні» матеріали. Вони виконують певні функції джерел руху або механізмів передачі руху, а також сенсорних середовищ, геометричної та об'ємної пам'яті.

На етапі проектування МЕМС-виробу складається специфікація процесу виготовлення. Проектування МЕМС-пристроїв здійснюється розробкою пристрою в тривимірному об'ємному 3D-моделюванні пошарової структури чіпів. Проектування компонентів МЕМС супроводжується необхідністю моделювання електричних, механічних та інших процесів і висуває певні вимоги до їх проектування. Інформаційне та програмне забезпечення застосовується на стадії проектування, моделювання і побудови пошарової топології. В результаті буде здійснено генерування фізичних масок.

При виготовленні МЕМС процеси відбуваються із застосуванням багаторазових циклів осадження матеріалу, перенесенням певних зображень та видаленням матеріалу. Специфічними особливостями для технології виготовлення МЕМС є певні операції видалення, так званих, проміжних шарів матеріалу – жертвних шарів для відділення механічних частин. Створення МЕМС-виробів вимагає нанесення більш товстих плівок, значного

по глибині травлення, а технологічний процес виготовлення МЕМС має більше етапів.

На стадії, коли пластина вже готова забезпечують тестування електричних параметрів і не тільки. Сьогодні все ширше застосовується тестування за допомогою оптичних методів геометрії мікромеханічних структур виробів. При виконанні процесу поділу пластини на окремі частини і на стадіях компоновки і сбору МЕМС в корпус, мікромеханічні структури є більш уразливими, ніж чіпи звичайних ІС, тому МЕМС-вироби потребують захисту з використанням спеціалізованих технологій та методик. Далі здійснюється ущільнення елементів і корпусування МЕМС-виробів. Single Chip Package (SCP) – корпусування окремого чипа являє собою завершальний і важливий етап мікроелектронного виробництва. На цьому етапі напівпровідниковий кристал встановлюється в корпус [7]. Корпусування чіпа істотно впливає на ціну МЕМС-виробу. Кошторис виробництва мікроелектромеханічних систем демонструє, що вартість корпусування, складання та тестування виробу становить 50% - 80% від вартості системи.

Вимоги до захисту МЕМС-виробів та ціна корпусування значно варіюються у певних межах з урахуванням певних умов експлуатації. Для забезпечення захисту структури від зовнішніх впливів для всіх МЕМС потрібне корпусування. На рис. 1.5 показано технологічну послідовність виконання корпусування окремого чипа МЕМС.

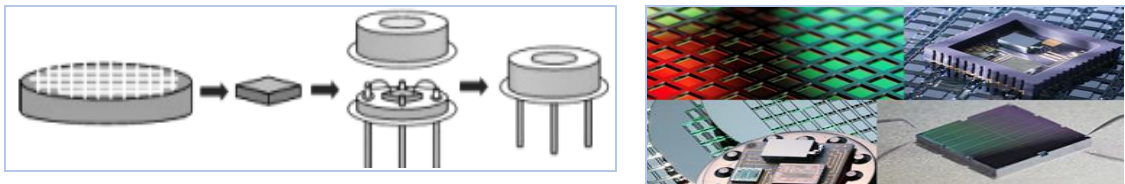


Рисунок 1.5 – Технологічна послідовність корпусування

Окремий мікročип є багатократно дубльованим елементом кремнієвої підкладки, він акуратно вирізається з кремнієвої пластини. Далі чип кріпиться до основи окремого корпусу, контактні площини окремого чипа електрично з'єднуються із виводами корпусу.

Корпуси MEMC-пристроїв бувають повністю герметично закритими і можуть бути металеві, металоскляні, металокерамічні або пластикові. Після корпусування здійснюється остаточне тестування MEMC-виробу.

На рис.1.6 показано приклад пластикової упаковки трьохосьового MEMC-акселерометра фірми STMicroelectronics: а - вид упаковки виробу зверху та знизу, б - складені ASIC та пристрій MEMC [8].

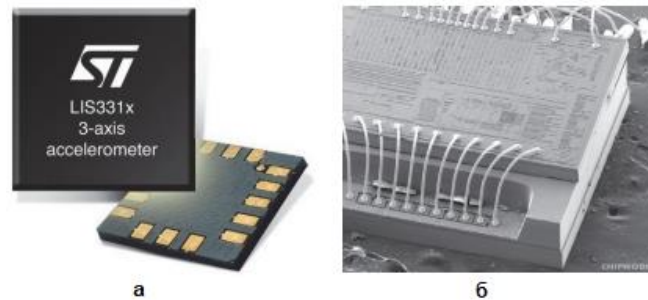


Рисунок 1.6 – Пластикова упаковка трьохосьового MEMC-акселерометра фірми STMicroelectronics: а - вид упаковки зверху та знизу, б - складені ASIC та пристрій MEMS

1.3 Призначення та класифікація MEMC-сенсорів

Сенсором є пристрій, що перетворює фізичну величину різної природи (неелектричну або електричну) в електричний сигнал і конструктивно являє собою завершений перетворювач. Сенсор являє собою складний пристрій, в якому електричні сигнали посилюються, перетворюються та можуть бути виміряні електронними пристроями. Вихідні сигнали сенсорів різні, можуть бути напругою, струмом. Характеристиками вихідних сигналів є амплітуда, частота, цифровий код тощо [9].

Сенсори характеризуються вхідними і вихідними параметрами. Перетворення вхідних фізичних величин у вихідні сигнали з відповідними характеристиками пов'язано з перетворенням певного виду енергії в інший або у той же вид енергії. Характеристики сенсорів бувають статичні і динамічні. У статичному режимі на вході пристрою діє стала фізична величина. В динамічному режимі динамічні характеристики пристрою обумовлені певною інерційністю, яка може значно впливати на результат функціонування пристрою.

Сенсорні компоненти мають різні класифікації. За принципом перетворення енергії сенсори бувають активні або генераторні та пасивні або параметричні. Такі сенсори мають різні способи формування сигналу, а також схеми підключення. Активний сенсор МЕМС генерує власний електричний сигнал, додаткового зовнішнього джерела енергії такий сенсор не потребує. Прикладом активного сенсору є п'єзоелектричний сенсор, термопари. Для роботи пасивного сенсора потрібно джерело зовнішньої енергії, тобто сигнал збудження. Пасивні сенсори змінюють свої характеристики (параметри) внаслідок зміни зовнішньої дії, тому мають другу назву- параметричні. Активні сенсори називають генераторними, оскільки в результаті зовнішнього впливу, на їх виході з'являється різниця потенціалів - вихідний сигнал.

За просторовою селективністю сенсори існують двох груп, а отже, сенсори спрямованої і неспрямованої дії. За способом детектування сенсорні компоненти МЕМС можуть бути контактними і безконтактними. Контактні сенсори безпосередньо контактують з об'єктом, наприклад, сенсори температури. Безконтактні сенсори не мають безпосереднього зв'язку з певним об'єктом. Прикладом може бути безконтактний індуктивний сенсор наближення, в якому обмін енергією між сенсором і об'єктом виконується за допомогою магнітного поля.

Сенсорні компоненти МЕМС бувають однофункціональні та багатфункціональні за кількістю функцій, що виконую сенсор.

Однофункціональні сенсори сприймають величину та формують вимірювальний сигнал, що є основною функцією сенсора. Багатофункціональні сенсори окрім основної функції можуть виконувати інші додаткові функції, наприклад, функцію обробки даних, зберігання сигналів тощо.

Сенсорні компоненти MEMS можуть сприймати та перетворювати одну або декілька величин, тому, відповідно існують одномірні сенсори, які сприймають одну вхідну величину та n-мірні сенсори, які оперують з множиною вхідних величин.

1.4 Класифікація MEMS-акселерометрів

Одними з перших продуктів компанії Analog Devices були сенсори прискорення – MEMS-акселерометри. Найбільш широке застосування акселерометри знайшли в таких галузях, як: системи навігації літальних апаратів, автомобільні подушки безпеки, спідометри, відеореєстратори та інші застосування в цій галузі, інформаційні технології, а отже смартфони, планшети, оутбуки, промислові системи контролю вібрації різних машин, зокрема, системи захисту, що відключають живлення або змінюють характеристики роботи при досягненні критичних значень.

MEMS-акселерометри представляють собою сенсори, що призначені для вимірювання лінійних та кутових прискорень рухомих об'єктів. Акселерометри здійснюють вимірювання прискорення рухомих об'єктів та перетворюють прискорення в сигнал, за допомогою якого визначаються параметри траєкторії руху об'єкта, а також для виконання цілей автоматичного управління траєкторією.

MEMS-акселерометри вимірюють прискорення маси в проекціях на певні напрямки. У склад акселерометрів входить детектор переміщень, який здійснює вимірювання малих амплітуд вібраційних коливань або лінійних прискорень.

Мікроакселерометри представляють собою електромеханічні пристрої, що сприймають статичні або динамічні сили прискорення. МЕМС-акселерометр вимірює прискорення або силу, яка викликає прискорення інерційної маси (ІМ). Мікроакселерометри мають механічну, а також електричну складові.

МЕМС-акселерометри можуть поділятися за кількістю параметрів, що вимірюються. Існують одноосьові, двоосьові та трьохосьові акселерометри. Одноосьові (однокомпонентні) акселерометри мають одну вісь чутливості та вимірюють єдину складову лінійного прискорення. В двоосьових та трьохосьових акселерометра є дві та три осі чутливості відповідно. Названі сенсори вимірюють дві чи три складові лінійного прискорення відповідно.

Основними параметрами акселерометра є: діапазон вимірювань прискорень, коефіцієнт перетворення, поріг чутливості, амплітудно-частотні характеристики (АЧХ), похибки статичні та динамічні.

Мікроакселерометри класифікуються за принципом роботи і діляться на дві групи: мікромеханічні осьові акселерометри та мікромеханічні маятникові акселерометри. В залежності від руху інерційної маси мікроакселерометри класифікують, як акселерометри з поступальним та кутовим переміщенням інерційної маси сенсора. Структура акселерометра може бути розімкнена або замкнена

Мікромеханічні акселерометри класифікуються за принципом вимірювання лінійного прискорення, яке супроводжується перетворенням сигналів, та діляться на мікромеханічні акселерометри прямого перетворення та мікромеханічні акселерометри компенсаційного перетворення.

В мікромеханічних акселерометрах прямого перетворення чутливі елементи безпосередньо передають інформаційні сигнали про прискорення, що діє на мікроакселерометр. Дія прискорення впливає на переміщення чутливого елемента або деформації пружних елементів (переміщень або деформацій).

В мікроакселерометрах компенсаційного перетворення сила, яка викликана вимірюваним прискоренням, частково або повністю може бути врівноважена через негативний зворотний зв'язок, який здійснює силову компенсацію чутливого елемента через вихідний сигнал, що надходить на вхід пристрою компенсації - перетворювачі сили або моменту. При цьому точність вимірювального ланцюга тоді залежить від компонента системи - перетворювача сили (моменту).

Статичні сили включають у себе гравітацію, а динамічні - можуть включати рух і вібрацію. Вихідний сигнал МЕМС-сенсора можна проінтегрувати, інтегрування може бути одноразовим або двохразовим і внаслідок цього отримати певне зміщення або швидкість.

МЕМС-сенсори руху - акселерометри, гіроскопи, моделюють процеси, параметри яких має реєструвати мікромеханічна структура. Рухома структура цих МЕМС-пристроїв не пов'язана з об'єктом, тому вони є безконтактними пристроями. Якщо рухома структура якісно і уважно спроектована, вся виконана у корпусі, то мікросенсор або мікроактюатор виявляється високонадійним і може виконувати свої функції в різних середовищах, при різних температурах, вібраціях, вологості, забруднень та інших впливів. При цьому забезпечується надійна робота в динамічному режимі.

1.5 Постановка завдання дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є розробка імітаційної моделі інерційного МЕМС-сенсора, процедури моделювання МЕМС-акселерометрів в рухомих об'єктах з використанням пакету Matlab/Simulink.

Об'єктом дослідження є МЕМС-акселерометри в рухомих об'єктах. Предметом дослідження є моделі мікромеханічних акселерометрів в Matlab/Simulink.

Для досягнення мети були визначені наступні завдання:

- аналіз особливостей проектування, що включає в себе аналітичне математичне моделювання; та виготовлення MEMC;
- аналіз структури вбудованої системи;, типів та видів сенсорних компонентів сучасних MEMC-акселерометрів;
- аналіз механічної системи MEMC-акселерометра та розробка рівняння динаміки осьового акселерометра;
- розробка Simulink-моделі механічної системи акселерометра за допомогою процедур моделювання;
- розробка імітаційної Simulink-моделі механічного компонента MEMC-акселерометра;
- поведінкове моделювання розробленої моделі в Matlab/Simulink.

2 КОНСТРУКЦІЯ ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

У даному розділі розглянуто типи мікромеханічних акселерометрів та видів сенсорних компонентів акселерометрів, описано конструкцію осьового акселерометра, отримано рівняння динаміки механічного компонента МЕМС-акселерометра, отримано математичну модель електричної складової акселерометра.

2.1 Типи мікромеханічних МЕМС-акселерометрів

Мікромеханічні сенсори прискорень бувають двох типів - мікромеханічні осьові акселерометри та мікромеханічні маятникові акселерометри. Акселерометри можуть бути з поступальним та кутовим переміщенням маси, внаслідок характеру руху ІМ. На рис. 2.1 зображено схеми осьових МЕМС-акселерометрів прямого перетворення: хрестоподібні (рис. 2.1, а), Z-подібні кососиметричні (рис. 2.1, б), симетричні (рис. 2.1, в) і з паралельним підвісом (рис. 2.1 г).

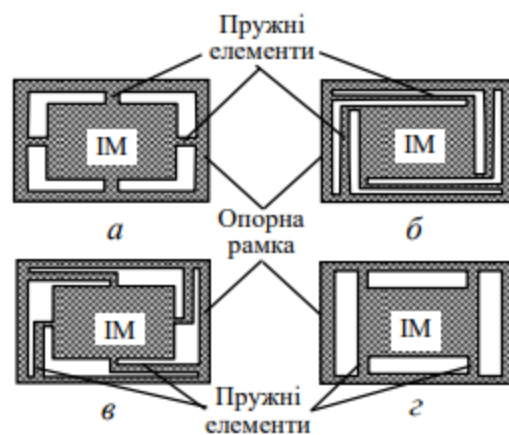


Рисунок 2.1 – Схеми осьових МЕМС-акселерометрів прямого перетворення

Осьові мікромеханічні МЕМС-акселерометри характеризуються лінійним переміщенням інерційної маси ІМ під дією зовнішнього лінійного прискорення [10]. Основним конструктивним компонентом осьового акселерометра є опорна рамка і чутливий елемент, який включає ІМ та пружні елементи підвісу.

Маятникові мікромеханічні МЕМС-акселерометри лінійних прискорень характеризуються кутовим переміщенням інерційної маси ІМ. З'єднання ланок в структурі акселерометра може бути розімкненим або замкненим. Схеми маятникових МЕМС-акселерометрів можуть мати декілька варіантів: схеми з одинарними маятниками (рис. 2.2, а), подвійними маятниками (рис. 2.2, б), які містять пружні компоненти - балки і схема з одинарним маятником (рис. 2.2, в), яка містить пружні компоненти - торсіони. Здійснювати вимірювання переміщення ІМ можна за допомогою емнісних або п'єзорезистивних сенсорів.

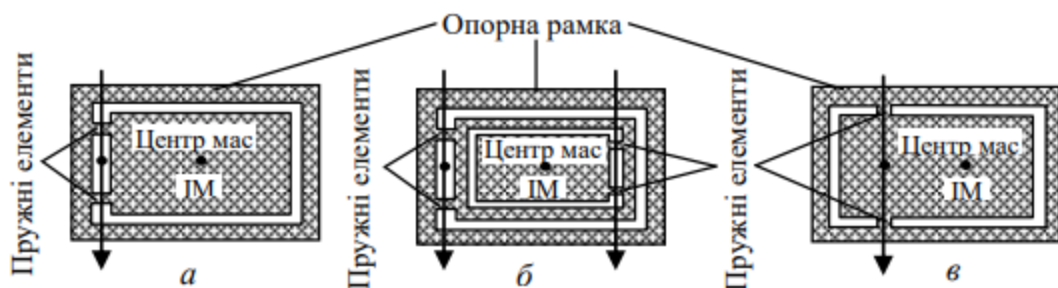


Рисунок 2.2 – Схеми маятникових МЕМС-акселерометрів

На рис 2.3 приведений приклад МЕМС-сенсора фірми Bosch, в якому реалізується маятниковий принцип побудови МЕМС-акселерометра за третім варіантом.

Даний акселерометр містить одинарний маятник, який підвішений на торсіонах. Прискорення в акселерометрі у вертикальному напрямку здійснює

нахил інерційної маси ІМ, при цьому центр маси рухомої частини обертової рамки зміщений у бік ІМ.

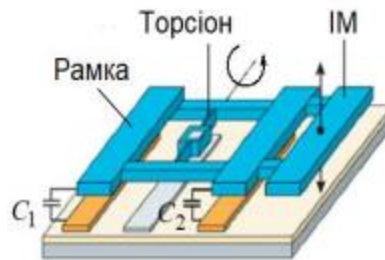


Рисунок 2.3 – Маятниковий МЕМС-акселерометр

МЕМС-акселерометри фірми Bosch реалізують вимірювання на основі ємнісного диференційного принципу. Інерційна маса й електроди потребують ущільнення при розміщенні на об'ємній підкладці. Сенсорний елемент разом з ASIC розміщуються в одному корпусі.

При детектуванні руху інерційної маси залежно від способу, яким можна отримати електричний сигнал, принципи роботи акселерометрів розрізняються. Акселерометри, які знайшли найпоширеніше використання базуються на певних принципах дії чутливих елементів, а саме ємнісному, п'єзоелектричному та п'єзорезистивному які розглянуті нижче.

Ємнісні акселерометри є найресповсюдженими на сьогоднішній день серед сучасних МЕМС-сенсорів.

Компанія Analog Devices займається виробництвом серії ємнісних акселерометрів ADXL, виготовленими за допомогою поверхневої обробки, що виконані на підкладці з полікристалічного кремнію. МЕМС-сенсор лінійних прискорень виготовляють за допомогою методу осадження тонких плівок матеріалу на основу з подальшим витравлюванням конструкції необхідної конфігурації його рухомої частини. Analog Devices також випускає тривісні МЕМС-акселерометри типу ADXL375, що можуть забезпечити прискорення до $\pm 200g$.

На рис. 2.4 приведено конструкцію емнісного МЕМС-акселерометра, на рис. 2.5 багаторазово збільшену конструкцію МЕМС-акселерометра типу ADXL.



Рисунок 2.4 – Ємнісний МЕМС-акселерометр

В осьовому емнісному МЕМС-акселерометрі перетворювач вихідних сигналів представляє конденсаторну архітектуру з повітряним діелектриком. Рухомі полікремнієві обкладки конденсатора мають вигляд зубців гребінки по краях плоскої ІМ. Таку форму при виготовленні отримують за допомогою технології травлення. Нерухомі частини у вигляді обкладки-зубців цього конденсатора – алюмінієві консольні стрижні. Вони розміщені на певній висоті приблизно 1 мкм від поверхні кристала в повітрі на полікремнієвих анкерах.

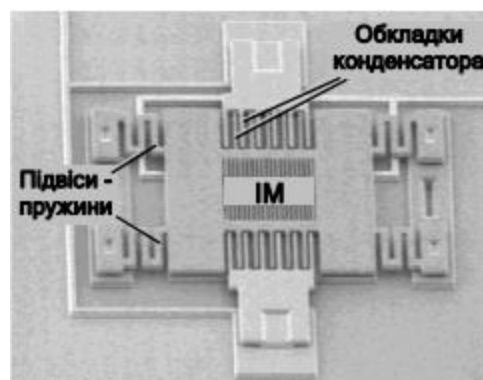


Рисунок 2.5 – Ємнісний МЕМС-акселерометр фірми Analog Devices

Одна з провідних компаній Європи є STMicroelectronics, яка також, як і Analog Devices, займається дослідженнями в напрямку MEMS-технологій та виробництвом MEMS-акселерометрів і гіроскопів. Сенсорний елемент, що є складовою MEMS-акселерометрів фірми STMicroelectronics являє собою компонент з конструкцією ємнісного типу. Така конструкція аналогічна акселерометрам ADXL. При виробництві даних акселерометрів використовується технологія THERMA, що здійснює поверхневий процес мікрооброблення. Даний процес базується на змінному формуванні на основі-підкладці з полікремнію товстих та тонких шарів матеріалу з метою відтворення об'ємних мікромеханічних структур. Ця технологія дозволяє формувати в одному кристалі механічні компоненти з переміщеннями лінійними та кутовими. Механічні елементи прикріплюються до основи в певних анкерних точках. На рис. 2.6 приведено двовісний лінійний акселерометр, в якому сенсорний чип виконаний в сукупності з кристалом ASIC.

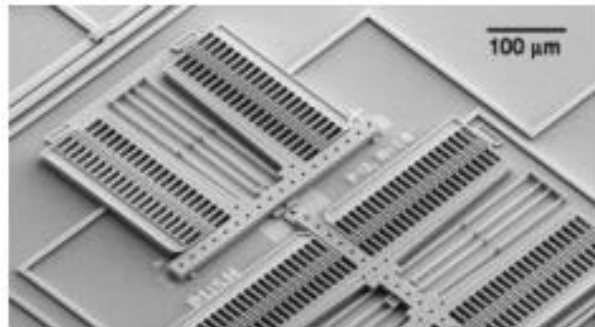


Рисунок 2.6 – Двовісний MEMS-акселерометр фірми STMicroelectronics

Широко відомим виробником MEMS-пристроїв, в тому числі і ємнісних MEMS-акселерометрів є фірма Freescale Semiconductor. MEMS-акселерометр Freescale Semiconductor представляє ємнісну мікромеханічну поверхневу структуру, що має назву G-комірки, яка об'єднує в єдиному

корпусі сенсор, і схеми обробки сигналу та температурної компенсації. В даній структурі сенсор, схеми оброблення сигналу та температурної компенсації виконані в єдиному корпусі (рис.2.7). Даний МЕМС-акселерометр є мікромеханічною структурою, що виконана з полікремнію.

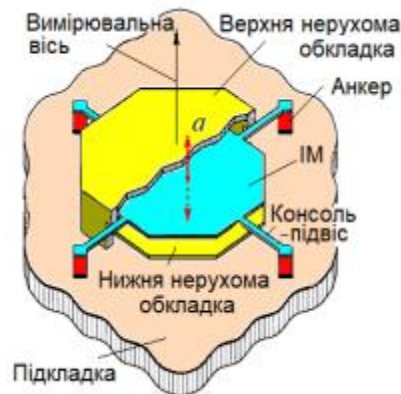


Рисунок 2.7 – Ємнісний МЕМС-акселерометр фірми Freescale Semiconductor

В структурі ІМ представляє собою певну рухому обкладку конденсатора. ІМ кріпиться в декількох точках, в даній конструкції в чотирьох на підкладці, і може переміщатися під впливом прискорення між нерухомими частинами верхніх та нижніх електродів. Розглянутий принцип використаний, зокрема, в МЕМС-акселерометрі M1220D. G-комірка вироблена за допомогою технологій поверхневої мікрообробки. Дана конструкція розміщується на підкладці, компоненти конструкції ущільнюються. Конструкція герметично захищена за допомогою об'ємного ковпачка від механічних пошкоджень і ударів. Крім того під ковпачком утворюється певне середовище, яке виконує функцію газового демпфування рухомої обкладки. На рис. 2.8 проілюстровано мікроакселерометр MMA7450L створений фірмою Freescale Semiconductor. Товщина корпусу мікроакселерометра складає 0,8 мм. Даний прилад може бути добре використаний в мініатюрних електронних пристроях, в яких завдяки йому може бути організований інтерфейс користувача, що побудований на

принципі фіксації рухів у просторі. МЕМС-акселерометр розрахований на спільну інтеграцію з мікропроцесорами та мікроконтролерами. Даний мікроакселерометр не потребує проміжних перетворень і внаслідок цього спрощується схема, зменшується кількість компонентів МЕМС-системи.



Рисунок 2.8 – Мікроакселерометр MMA7450L фірми Freescale Semiconductor

Значний обсяг МЕМС-акселерометрів складають п'єзоелектричні акселерометри. На рис. 2.9 зображено п'єзоелектричний чутливий елемент акселерометра. Дані сенсори базуються на п'єзоелектричному ефекті, що полягає у прямому перетворенні механічної енергії в електричну в п'єзоматеріалах. Дані матеріали мають кристалічну структуру, що включає у себе електричні диполі. Сутність прямого п'єзоелектричного ефекту полягає у виникненні поляризації матеріала діелектрика під дією механічної напруги і внаслідок цього деформації матеріала. Деформація п'єзоелектричного елемента сприяє виникненню електричної напруги між поверхнями деформованого матеріала.

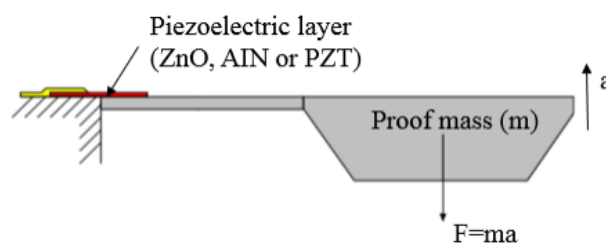


Рисунок 2.9 – П'єзоелектричний чутливий елемент акселерометра

П'єзоелектричний матеріал діелектрика генерує на своїх поверхнях, до яких прикріплені електроди, електричний заряд, який пропорційний силі, що впливає. Дана деформація пропорційна швидкості переміщення маси M , а отже і прискоренню. П'єзоелектричні MEMC-акселерометри являють собою активні сенсори, що генерують електричний сигнал, який пропорційний механічним коливанням. Кристал п'єзоматеріалу поєднаний із інерційною масою. Електричний контакт компонента п'єзоматеріала в даній системі відбувається за рахунок двох тензодатчиків, що розташовані на кристалі п'єзоматеріала. Завдяки тому, що в даній конструкції відсутні рухомі елементи, відсутній знос конструкції, тому MEMC-акселерометри п'єзоелектричного типу є довговічними. Трьохосьова конструкція п'єзоелектричного MEMC-акселерометра маятникового типу зображено на рис. 2.10. Один чутливий елемент MEMC-акселерометра може вимірювати прискорення у трьох напрямках. Провідними виробниками сучасних п'єзоелектричних MEMC-акселерометрів є Bruel & Kjaer, Bosch, Kistler, PCB Piezotronics.

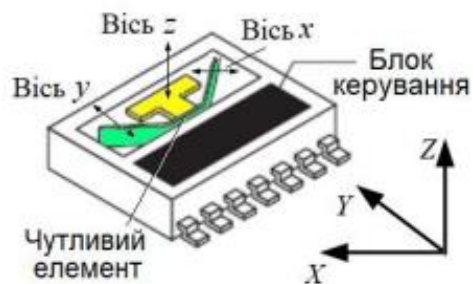


Рисунок 1.0 – Конструкція п'єзоелектричного MEMC-акселерометра

В даний час сучасні п'єзорезистивні MEMC-акселерометри створюють фірми Endevco, Measurement Specialities, Entran, Sensor One Technologies.

П'єзорезистивні MEMC-акселерометри мають чутливий елемент, який називається тензосенсором. Електричний опір сенсорних елементів даного MEMC-акселерометра є пропорційним механічній напрузі. Напруга

прикладена до рухомої інерційної маси, що встановлена на пружинах. Тензосенсор вимірює деформацію п'єзорезистивних елементів. При цьому опори залежать від величини деформації. Дана деформація пропорційна величині та швидкості переміщення інерційної маси, а отже прискоренню.

П'єзорезистивний МЕМС-акселерометр (рис. 2.11) має основу 1 і представляє собою структуру кремнію 2, яка має консольні балки, які підтримують 3 - інерційну масу ІМ.

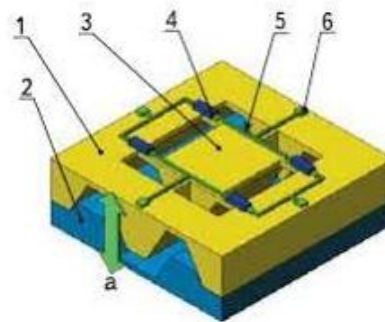


Рисунок 2.11 – П'єзорезистивний МЕМС-акселерометр

Для детектування прискорення використовуються кремнієві резистори 4, які є вимірювачами механічної напруги. Вони приєднані до кремнієвих консольних балок. Прискорення ІМ викликає вигин балок і змінює опір резисторів, що по'єднані схемою моста Уїтстона 5, створюючи розбаланс даного мосту. В діагональ мосту 6, підключають вимірювачі напруги, які вимірюють діючі прискорення [11].

На рис. 2.12 зображено вимірювальний міст Уїтстона, в якому R1, R4 – резистори, які реєструють збільшення тиску, R2, R3 - резистори, що реєструють зменшення тиску. П'єзорезистивний МЕМС-акселерометр виконується за технологією об'ємної мікрообробки.

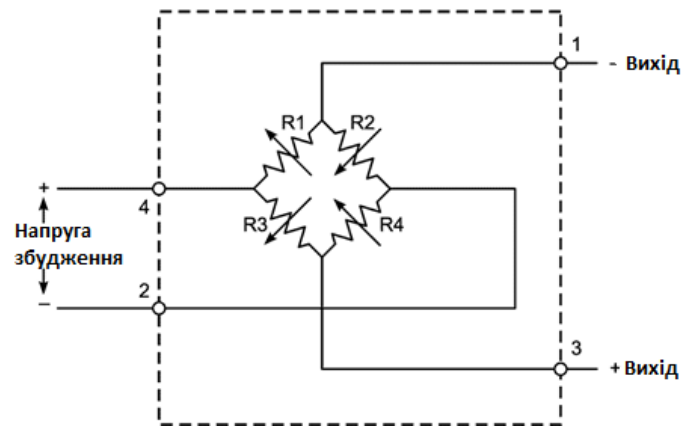


Рисунок 2.12 – Вимірювальний міст Уїтстона

2.2 Механічна схема та рівняння динаміки МЕМС-акселерометра

Акселерометр вимірює проекцію уявного прискорення. Уявне прискорення є різницею між справжнім прискоренням даного об'єкта і прискоренням сили тяжіння. У МЕМС-акселерометра є вісь чутливості і перпендикулярні до неї поперечні вісі. Вісь чутливості є віссю, в напрямку якої переміщується інерційна маса. В одному корпусі МЕМС-акселерометра можуть бути встановлені інерційні маси, в яких різні напрямки вісі чутливості (двох- та трьохосьові акселерометри). Мікроакселерометри можуть вимірювати уявне прискорення по одній, двом або трьом вісям.

В даній кваліфікаційній роботі обрана класична конструкція осьового мікромеханічного МЕМС-акселерометра з ємнісними сенсорами виміру переміщень інерційної маси (чутливого елемента).

Інерційна маса, закріплена в пружному підвісі і є обов'язковим компонентом чутливого елемента мікроакселерометра. МЕМС-акселерометри є чутливими до механічних коливань. Чутливі коливання виникають у напрямку головної вісі. Крім того виникають коливання в перпендикулярній до головної вісі площини, до яких МЕМС-акселерометр теж чутливий. Поперечна чутливість, що виникає, характеризує здатність МЕМС-сенсора здійснювати перетворення в електричний сигнал прискорення, що є

направленим під кутом 90° до вісі чутливості сенсора. Значення поперечної чутливості відносно i може бути виражене у відсотках від значення чутливості в напрямку головної вісі. Поперечна чутливість ідеального МЕМС-акселерометра має значення «0».

Розглянемо механічну схему та принцип дії лінійного МЕМС-акселерометра на прикладі одноосьового акселерометра, що має пружинний підвіс чутливого елемента [12]. Механічна схема лінійного МЕМС-акселерометра приведена на рис. 2.13. Акселерометр, який вимірює лінійне прискорення, складається з інерційної маси M , пружного елемента Π та демпфера D .

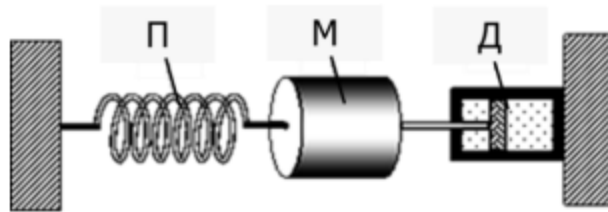


Рисунок 2.13 – Механічна схема осьового МЕМС-акселерометра

Інерційна маса M може переміщатися тільки уздовж прямої, що є віссю акселерометра. Інерційна маса рухається в даному напрямку з прискоренням a . На масу M діє сила інерції, що є добутком маси та прискорення: $M \cdot a$ відповідно до 2-го закону Ньютона. Під дією сили інерції маса M починає здійснювати рух та деформує пружний елемент Π , що протидіє руху. Відхилення маси M в корпусі сенсора від її початкового положення при наявності уявного прискорення є інформаційним сигналом про величину даного прискорення. У даній конструкції акселерометра демпфер гасить коливання маси M . Демпфер чинить опір руху маси M із силою, що пропорційна швидкості її руху, та яка перетворює енергію коливального руху у тепло. Вихідний сигнал, який пропорційний виміряному прискоренню, вимірюється потенціометричним перетворювачем. Чим більше величина

увного прискорення, тим більше деформується пружина і внаслідок цього змінюються показання пристрою. При русі інерційної маси з прискоренням a до інерційної маси M прикладені фізичні сили: сила інерції, сила деформації пружини, сила тяжіння уздовж вісі чутливості.

Рух інерційної маси M описується диференціальним рівнянням:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = Ma, \quad (2.1)$$

де a - поточне прискорення об'єкту, на якому знаходиться МЕМС-акселерометр;

x - відхилення інерційної маси M від рівноваги;

b - коефіцієнт загасання внаслідок демпфування;

k - коефіцієнт жорсткості пружного компонента.

Демпфер регулюється, щоб коефіцієнт загасання був максимального значення. При цьому час реакції МЕМС-акселерометра внаслідок зміни прискорення виявляється найменшим. Навіть якщо прискорення коливання змінюється срибкоподібно, то нового положення рівноваги не виникає. Для того, щоб визначити значення прискорення a , потрібно виміряти відхилення x від положення рівноваги або силу деформації $F=k \cdot x$, що діє на елемент пружини. В результаті завдяки інерційній масі здійснюється перетворення первинного сигналу лінійного прискорення у механічне переміщення або в силу деформації пружного елемента.

Далі складемо диференційне рівняння динаміки МЕМС-акселерометра. Рівняння динаміки акселерометра відображає як поводить себе чутливий елемент (інерційна маса) в перехідних режимах. Інерційна маса, яка здійснює рух з прискоренням $a = \dot{V}$. При цьому проекція даного прискорення на вісь x позначається, як \dot{V}_x .

В перехідному режимі на сенсорний елемент діють наступні сили.

1. Сила інерції, визначається за допомогою виразу:

$$F_i = m\ddot{x} \quad (2.2)$$

2. Сила демпфування, яка визначається, як:

$$F_d = k_d \dot{x} \quad (2.3)$$

де k_d - коефіцієнт демпфування в системі.

3. Сила тяжіння, що діє уздовж вісі чутливості та визначається, як:

$$G_x = mg_x \quad (2.4)$$

Рівняння динаміки акселерометра, а отже рівняння руху інерційної маси представляється диференціальним рівнянням другого порядку та має вигляд:

$$m\ddot{x} + k_d \dot{x} + k_y x = -m(\dot{V}_x - g_x) \quad (2.5)$$

Виконавши перетворення, рівняння приймає вигляд:

$$m\ddot{x} + k_d \dot{x} + k_y x = m\dot{V}_{kx} \quad (2.6)$$

Диференційне рівняння (2.6) є основним рівнянням динаміки лінійного МЕМС-акселерометра з поступальним переміщенням чутливого елемента (інерційної маси).

Якщо в системі є сили тертя, то у праву частину диференційного рівняння необхідно додати силу тертя F_{mp} :

$$m\ddot{x} + k_d \dot{x} + k_y x = m\dot{V}_{kx} - F_{mp}. \quad (2.7)$$

При проведенні досліджень в системах управління компоненти, які входять до складу структури системи, можуть представлятись у вигляді ланок з передавальними функціями кожної ланки. Тоді треба перейти до операторної форми запису рівняння динаміки акселерометра. Застосувавши перетворення Лапласа, отримано диференціальне рівняння при початкових умовах, що дорівнюють нулю. Рівняння має вигляд:

$$m p^2 X(s) + k_d p X(s) + k_y X(s) = m V(s), \quad (2.8)$$

де $X(s)$ - зображення переміщення інерційної маси,

$V_{kx}(s)$ - зображення прискорення об'єкта.

При розгляді спрощеної механічної системи сенсорного елемента прискорення об'єкта є вхідним сигналом системи, вихідним сигналом системи є значення переміщення інерційної маси уздовж вісі акселерометра.

В результаті передавальна функція $W(s)$ по каналу «прискорення – переміщення інерційної маси» визначається, як:

$$W(s) = \frac{X(s)}{V_{kx}(s)} = \frac{m}{ms^2 + k_d s + k_y}. \quad (2.9)$$

При дослідженні динаміки сенсорного компонента досліджують частотні характеристики системи з урахуванням частотних параметрів. В цьому випадку рівняння динаміки акселерометра запишеться у вигляді:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \dot{V}_{kx} - \frac{F_{mp}}{m}, \quad (2.10)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{k_y}{m}}$ - частота недемпфованих коливань інерційної маси m чутливого елемента);

$2\xi\omega_0 = \frac{k_d}{m}$, ξ - величина загасання.

Якщо система розглядається у статичному режимі, а саме коли $\ddot{x} = \dot{x} = 0$ і $F_{mp} = 0$. Тоді в результаті отримаємо рівняння, що має вигляд:

$$\omega_0^2 x = \dot{V}_{kx}.$$

В результаті чутливість елемента може бути визначена, як:

$$h = \frac{1}{\omega_0^2}. \quad (2.11)$$

З (2.11) випливає, що чим вище частота власних недемпфованих коливань, тим менше чутливість сенсора.

Якщо припустити, що сила тертя $F_{mp} = 0$ та використавши оператор Лапласа та його перетворення, рівняння (2.10) має вигляд:

$$s^2 x(s) + 2\xi\omega_0 s x(s) + \omega_0^2 x(s) = \dot{V}_{kx}(s), \quad (2.12)$$

На основі рівняння (2.12) може бути отримана передавальна функція МЕМС-сенсора, яка визначається, як:

$$W(s) = \frac{X(s)}{\dot{V}_{kx}(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}. \quad (2.13).$$

Вихідна напруга MEMC-сенсора є пропорційною до переміщення інерційної маси, а отже, на основі (2.13), може бути визначена передавальна функція MEMC-акселерометра по каналу «прискорення - вихідна напруга»:

$$W(s) = \frac{X(s)}{\dot{V}_{kx}(s)} = \frac{h}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} \quad (2.14)$$

2.3 Математична модель ємнісного MEMC-акселерометра

Принцип ємнісного способу вимірювання полягає у вимірюванні переміщення маси, коли до перетворювача прикладається зовнішнє прискорення. Коли інерційна маса чутливого елемента MEMC-акселерометра відхиляється вздовж напрямку вісі чутливості, значення ємності між інерційною масою та нерухомими електродами змінюється і вимірюється величина даної ємності.

Існує кілька способів тестування MEMS-акселерометра, одним із яких є фізичне тестування під час виробництва сенсорів. Цей тип тестування використовує зовнішній фізичний вплив для збудження акселерометра та отримання кореляції між прикладеним прискоренням і вихідною напругою. Існують системи фізичного калібрування, які використовуються для визначення чутливості акселерометра. Однак існує і багато інших методів, заснованих на нефізичному впливі, в яких немає потреби застосовувати зовнішню силу, а лише аналіз електричної реакції сенсора, спричиненої електричним стимулом на акселерометр.

Доступ до внутрішніх структур сенсора забезпечується через штифти для самоперевірки, щоб увімкнути електричне збудження MEMC-акселерометра після пакування в корпус. Дані штифти для самотестування найчастіше доступні в комерційних сенсорах для перевірки простих робочих параметрів сенсора, таких як напруга втягування для виготовлених сенсорів,

або для перевірки структурних збоїв, таких як перешкода, яка перешкоджає руху інерційної маси або структурний дефект пружини. Коли електричний сигнал подається на паралельні пластини МЕМС-акселерометра, між пластинами генерується електростатична сила. Дана електрична сила використовується для імітації зовнішньої фізичної сили через прискорення пробної інерційної маси. Електричну силу, спричинену прикладеною напругою V , можна розрахувати за допомогою рівняння:

$$F_{electrical} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot C \cdot \frac{V^2}{d} = \frac{\epsilon_0 A}{2} \left(\frac{V}{d}\right)^2$$

На рис.2.14 схематично зображено ємнісний МЕМС-акселерометр до якого прикладена електростатична сила F .

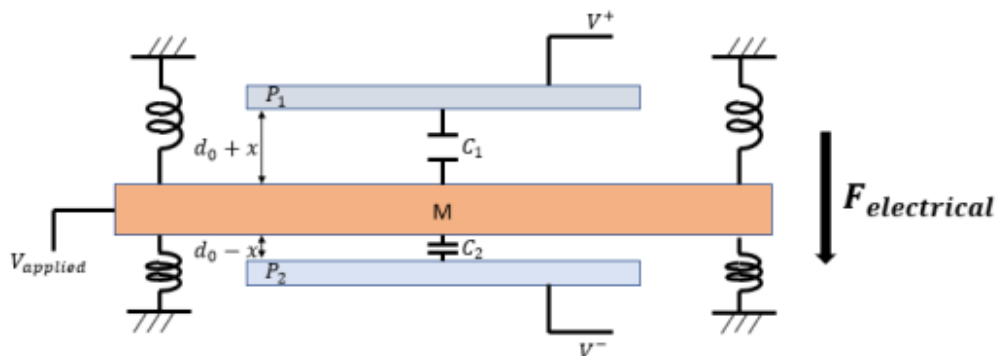


Рисунок 2.14 – Ємнісний МЕМС-акселерометр з прикладеною електростатичною силою

В ємнісному МЕМС-акселерометрі кожна фіксована обкладка формує схему сенсора прискорення, пластини конденсатора є рухомими. Обкладка конденсатора складається з двох окремих обкладок, в яких є активні поверхні на сторонах, що протилежні відносно центра конденсатора.

Розглянемо математичну модель ємнісного осьового МЕМС-акселерометра. Для того, щоб здійснити вимірювання ємності в системі, що

розглядається, на електроди конденсаторів C_1 та C_2 подається напруга V . Напруга V дає можливість вимірювати електростатичні сили F_1 та F_2 , що діють на рухому масу. У стані спокою дані сили є рівними та компенсують одна одну. Коли напруга прикладена до електродів, ємності конденсаторів змінюються, стають різної величини і змінюються електростатичні сили F_1 та F_2 . Ємність конденсаторів є величиною змінною, яку треба знайти.

Електрична ємність конденсатору може бути визначена, як:

$$C = \varepsilon \frac{S}{x}, \quad (2.16)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу;

S – площа пластини електроду;

x - відстань між обкладками конденсатора МЕМС-акселерометра.

Далі необхідно записати вираз, що визначає заряд конденсатору.

Формула визначення заряду конденсатору може бути записана у вигляді:

$$q = CV, \quad (2.17)$$

де V – напруга, яка прикладається до електродів конденсатору.

Рухома обкладка конденсатору переміщується на певну відстань x і відбувається приріст заряду обкладки конденсатору, що переміщується, який описується формулою:

$$dq = q_1 - q_2 = 2\varepsilon SV \frac{dx}{x^2 - dx^2}. \quad (2.18)$$

Формула (2.18) показує, що залежність приросту заряду dq конденсатора від певної зміни відстані між обкладинками конденсатора dx є нелінійною. В результаті приріст напруги dV на обкладинці конденсатора,

що рухається, лінійно залежить від певної зміни відстані dx між обкладинками:

$$dV = \frac{q}{\epsilon S} dx. \quad (2.19)$$

У ємнісному МЕМС-акселерометрі використовується ємнісний диференціальний сенсор. У сенсорі нерухомі пластини живляться рівними, але протифазними напругами. Синусоїдальна напруга має значення V та частоту коливання 1 МГц. В результаті, переходячи до комплексних величин, комплексне діюче значення напруги V , що виникає на середній пластині конденсатора, за методом двох вузлів, визначається, як:

$$V = \frac{V_1 j\omega C_1 + V_2 j\omega C_2}{j\omega C_1 + j\omega C_2}, \quad (2.20)$$

де ω - кругова частота.

Напруга V має лінійну залежить від переміщення електроду x . З урахуванням того, що прикладена напруга до електродів має протилежний знак $V_1 = -V_2$ і, враховуючи те, що виникає зміна відстані dx між обкладинками, ємність визначається, як:

$$C = \epsilon \frac{S}{x - dx}, \quad (2.21)$$

В результаті напруга V визначається, як:

$$V = V_1 \frac{dx}{x}. \quad (2.22)$$

З формули (2.22) випливає, що залежність напруги V на рухомих обкладинках конденсатору від переміщення є лінійною.

Електричні ємності C_1 та C_2 між нерухомими електродами і інерційною масою визначаються, як:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{\delta + x}, \quad C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{\delta - x}, \quad (2.23)$$

де ε – діелектрична проникність простору між площинами конденсатора;

S – площа пластини електроду;

x – переміщення між обкладками конденсатора МЕМС-акселерометра.

δ – відстань початкова між обкладками конденсатора МЕМС-акселерометра

ε_0 – діелектрична проникність вакууму.

В даному розділі було розглянуто типи мікромеханічних МЕМС-акселерометрів, описано конструкцію, принцип дії, рівняння динаміки осьового МЕМС-акселерометра та математичну модель ємнісного МЕМС-акселерометра.

3 МОДЕЛЮВАННЯ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

У розділі розглянуто етапи проектування МЕМС-пристроїв, процес створення імітаційної Simulink-моделі механічного компонента емнісного МЕМС-акселерометра, досліджено поведінкове моделювання розробленої моделі.

3.1 Проектування МЕМС-пристроїв з використанням засобів САПР

Проектування є складним процесом, який базується на глибоких наукових знаннях, здійсненні творчого пошуку ідей, рішень і потребує використання досвіду у певній галузі.

При проектуванні, виготовленні та експлуатації мікроелектромеханічних систем зустрічається маса особливостей, складностей, що обумовлені малими розмірами МЕМС-пристроїв. Тому проектування мікросистемної техніки є надзвичайно важливим. На сьогоднішній день існує достатня кількість спеціальних програмних засобів, що дозволяють здійснювати моделювання МЕМС-пристроїв. Розроблено спеціалізовані пакети моделювання та проектування МЕМС-пристроїв, зокрема, MEMS Pro, CoventorWare. При виконанні моделювання на мікрорівні можуть бути використані універсальні програмні пакети ANSYS, COMSOL, Matlab/Simulink. Дані програми дозволяють вирішувати завдання проектування і моделювання механіки конструкцій, рідин, газу, завдання електродинаміки, акустики, теплопередачі та інші завдання. Крім того пакет SUGAR (University of California, Berkeley) містить в собі бібліотеку елементів МЕМС, яка призначена для програмного пакету Matlab. Перелічені програмні засоби дозволяють здійснювати дослідження функціональних моделей, а також елементи МЕМС, що є неоднорідними. За допомогою комп'ютерного моделювання розробники можуть визначати певні механічні

та фізичні параметри елементів, компонентів МЕМС-пристрів та оптимальні конструктивні рішення. На даний момент комп'ютерне моделювання в галузі мікросистемної техніки є одним з основних напрямків створення та розвитку мікроелектромеханічних систем [13]. При створенні МЕМС-пристроїв використовують багаторівневе наскрізне та паралельне проектування. На системному рівні багаторівневого проектування здійснюється розробка технічного завдання (ТЗ), яке призначене для проектування ВС з урахуванням певних функцій, що має виконувати система. Наступним рівнем проектування МЕМС-пристроїв є функціональний рівень, третім рівнем є схемотехнічним, а четвертий рівень являє собою компонентний рівень.

Проектування включає у себе певні етапи та представляє собою процес складання специфікації, а отже, опису, що необхідний для створення певних заданих умов об'єкта на основі початкового опису алгоритму його функціонування. Проектування МЕМС-пристрою починається з опису мікросистеми, що має електричні та механічні параметри.

Наступний крок потребує проектування електричної схеми мікросистеми, а також подальшого аналізу МЕМС за допомогою певних програмних засобів. Створюється наближена модель електричної схеми мікросистеми. Далі здійснюється проектування конструкції механічної складової МЕМС і подальше моделювання її вихідних характеристик. Даний аналіз дозволяє зробити уточнення електричної схеми заміщення і інтегрувати її в загальну схему МЕМС-виробу. Проектування представляю собою ітераційний процес, який продовжується до тих пір, доти усі вихідні електричні і механічні параметри будуть задовольняти ТЗ. Після даного етапу проектування передбачено виготовлення і тестування мікросистеми. З урахуванням того, що мікросистеми є наукоємними пристроями, то для ефективного їх проектування необхідно використання методів, алгоритмів, моделей, інформаційних технологій, програмних засобів.

Математичні моделі які являють собою множина математичних об'єктів є основою САПР. Математичні моделі є коректним відображенням властивостей MEMC-пристроїв. Існують низхідний «згори-донизу», висхідний і змішаний етапи проектування. Висхідне проектування передбачає певну послідовність вирішення завдань, починаючи від нижніх рівнів до верхніх, а низхідне проектування іде від нижніх рівнів до верхніх, тобто виконується в зворотному напрямі.

Проектування MEMC-пристроїв включає проектування на компонентному рівні. Проектування MEMC-пристроїв здійснюється за допомогою блочно-ієрархічного підходу. Він передбачає використання принципу ієрархічності з метою структурування представлень про певні об'єкти, деталізацію описів. Використовується принцип декомпозиції, що передбачає поділ кожного рівня на блоки та можливість поблочне проектування об'єктів. Вихідними даними для виконання проектування та виготовлення MEMC-пристроїв є ТЗ з визначеними функціональними та конструктивними параметрами, а також розроблена 3D-модель. Формування певного вектора вихідних даних здійснюється на основі запропонованої моделі MEMC-пристрою. На наступному етапі здійснюється вибір типу MEMC, на основі якого здійснюється пошук MEMC-пристрою. На етапі проектування здійснюється пошук елементарних компонентів і далі формування елементів конструкції та структури вцілому. На подальшому етапі здійснюється структурно-параметричний синтез проекту виготовлення MEMC-пристрою.

3.2 Програмний пакет Matlab/Simulink для моделювання систем

Simulink є продуктом Mathworks, який забезпечує інтерактивне графічне середовище для моделювання, симуляції та аналізу динамічних систем на основі блок-схем. Simulink здебільшого використовується з Matlab,

поєднуючи текстове та графічне програмування для моделювання фізичних систем.

Simulink надає широку бібліотеку компонентів, які використовуються для побудови моделей блок-схем систем реального часу на основі потоку інформації. Елементи бібліотеки Simulink можна «перетягувати» у вікні моделі. Simulink дозволяє користувачам виконувати декілька функціональних можливостей, таких як моделювання на основі подій, моделювання фізичної системи, верифікація та валідація проекту на основі моделі у ВС, а також тестування в реальному часі.

При моделюванні систем в Matlab/Simulink існує можливість досліджувати поведінкове моделювання динамічних систем. Розробка чисельної моделі в досліджуваній динамічній системі здійснюється шляхом графічного складання певної структури з'єднань елементарних блоків, що розташовані в бібліотеках середовища Simulink. Кожний елементарний блок є математичною програмою, а лінії, що з'єднують блоки структури перетворюються на певні зв'язки між даними програмами. В результаті такого процесу створюється програмна модель. Модель називається S-моделлю або Simulink-модель, яка може бути збережена у файлі. Даний процес процес має назву візуального програмування.

В процесі побудови Simulink-моделі використовуються спеціальні модулі – блоки. Блоки зберігаються в зручній бібліотеці Simulink. Simulink-модель може бути у вигляді ієрархічної структури, а отже складатися з моделей нижчого рівня, при тому кількість рівнів може бути необмеженою. В процесі моделювання існує можливість спостерігати за певними процесами, що відбуваються в розробленій динамічній системі. З метою спостереження динаміки процесів використовуються спеціальні блоки, так звані, "оглядові вікна", які теж є в бібліотеці Simulink. Існує можливість поповнення бібліотеки Simulink користувачем, якщо ним будуть розроблені власні блоки.

Використання середовища Simulink є зручним при моделюванні систем, що можуть складатися із поєднаних окремих функціональних

пристроїв. При цьому поведінка пристроїв описується певними відомими функціональними залежностями. В цьому випадку схема з'єднань блоків візуалізації блок-схеми Simulink-моделі співпадає з реальними зв'язками між даними пристроями. При цьому істотно спрощується програмний аналіз та синтез систем управління. Matlab/Simulink є простотим ресурсом та характеризується наочністю використання при моделюванні різних пристроїв і систем, в тому числі і МЕМС-пристроїв. Головне вікно системи Matlab/Simulink приведено на рис. 3.1 У Matlab/Simulink використовується візуально-орієнтований підхід, який передбачає перенесення портівних блоків для створення Simulink-моделі з бібліотеки Simulink у поле вікна документа Simulink. При створенні моделі входи і виходи обраних блоків з'єднують лініями і в результаті буде створена Simulink-модель, динамічний процес в якій запускається за допомогою кнопки Run на панелі інструментів Matlab.

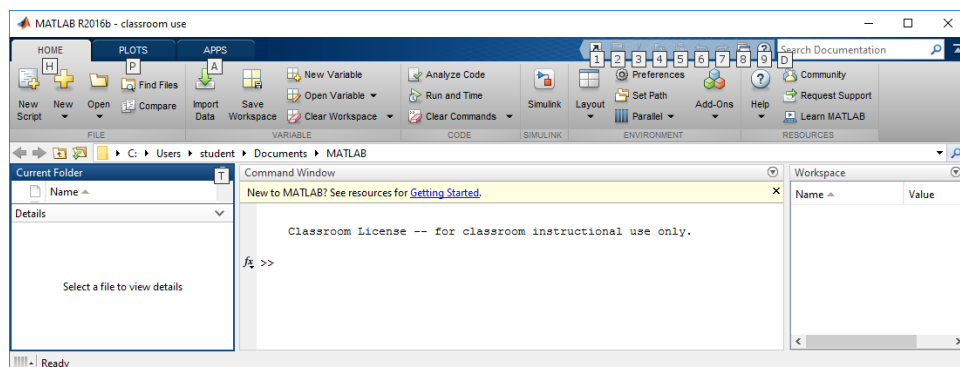


Рисунок 3.1 – Головне вікно системи Matlab/Simulink

Бібліотека Simulink представлена набором різних візуальних блоків, зокрема, джерела та приймачі сигналів, блоки безперервних моделей, блоки математичних операцій тощо. Для користування блоками необхідно натиснути кнопку Simulink Library на панелі інструментів Matlab. При цьому з'являється вікно навігатора – браузера Simulink Library (рис. 3.2).

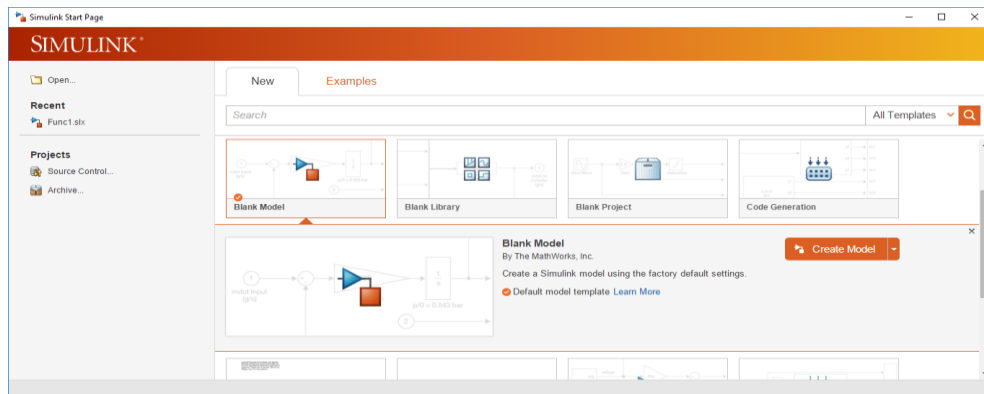


Рисунок 3.2 - Simulink Library Browser

Вікно браузера Simulink Library (рис.3.3) містить елементи.

1. Заголовок вікна бібліотеки – Simulink Library Browser.
2. Панель інструментів, що містить ярлики використуваних команд.
3. Вікно коментаря, призначеного для виведення повідомлення про певний обраний блок.
4. Список розділів бібліотеки, який реалізований у вигляді дерева.
5. Вікно вмісту розділу бібліотеки, тобто, список вкладених розділів бібліотеки або певних блоків.

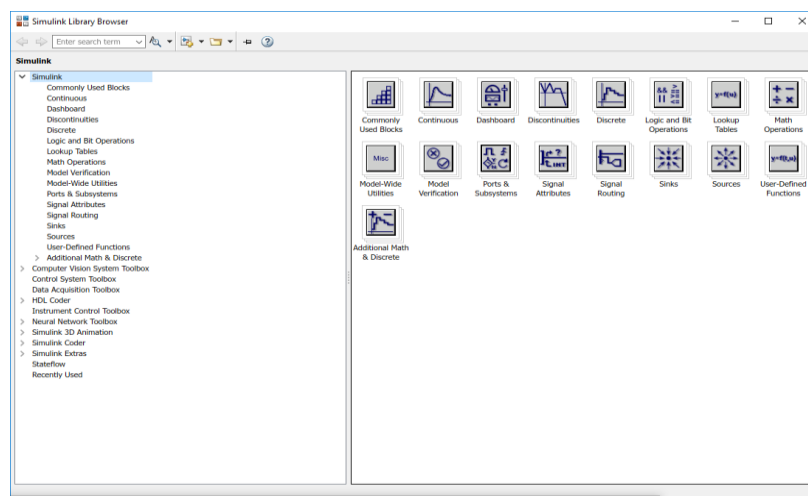


Рисунок 3.3 – Вікно Library Browser

3.3 Simulink-модель механічної системи MEMС-акселерометра

Імітаційна Simulink-модель механічного компонента емнісного MEMС-акселерометра була створена Simulink-модель механічної системи MEMС-акселерометра за допомогою програмного забезпечення MATLAB/Simulink з використанням графічних модулів. Імітаційна модель визначає вихідну реакцію системи на основі як фізичного, так і електричного впливу.

Пружна система осьового MEMС-акселерометра з масою m піддається впливу сили $F(t)$, що діє в напрямку $x(t)$. Механічна система осьового MEMС-акселерометра наведена у підрозділі 2.2, рис.2.13. Маса m переміщується тільки в напрямку x є коливальною системою з одним ступенем свободи. Пружинний елемент має жорсткість k і протидіє руху. В теорії коли інерційна маса зміщена та звільнена, вона буде коливатися з однаковою амплітудою продовж довгоготривалого періоду часу. В реальних умовах маса коливається з амплітудою, що поступово зменшується до того часу, коли прийде у стан спокою. Дане фізичне явище називається демпфуванням, яке викликано втратами енергії внаслідок сили тертя тертя, або інших сил, якщо вони діють в системі. Для того, щоб спростити моделювання, припускається, що сила демпфування пропорційна швидкості руху.

Simulink-модель механічного компонента осьового MEMС-акселерометра була розроблена на основі фізичної (механічної) системи, що описана дифференціальним рівнянням другого порядку (рис.3.4)

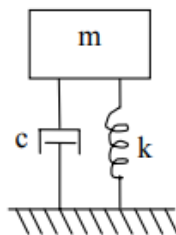


Рисунок 3.4 – Механічна модель акселерометра

Рівняння містить складові: перша складова – сила інерції в системі, друга складова – сила демпфування, третя складова – сила тяжіння та має вигляд:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t), \quad (3.1)$$

де c – коефіцієнт демпфування (затухання);

k – коефіцієнт жорсткості пружини.

Механічна модель системи залежить від певних фізичних параметрів: інерційної маси m , коефіцієнта жорсткості пружного компонента k , коефіцієнта демпфування c . Поведінка механічної системи, що описується формулою (3.1), характеризується двома параметрами, а отже, переміщенням $y(t)$ та швидкістю $\dot{y}(t)$.

Реакція механічної системи акселерометра визначається рівнянням руху, записаним відносно прискорення інерційної маси:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [f(t) - c\dot{x} - kx], \quad (3.2)$$

де \ddot{x} ($x\ddot{\cdot}$) – прискорення інерційної маси m ;

\dot{x} ($x\dot{\cdot}$) – швидкість руху;

x – переміщення інерційної маси;

$f(t)$ – прикладена сила, що є вхідною функцією: одинична функція або гармонійний сигнал;

c – коефіцієнт демпфування (затухання);

k – коефіцієнт жорсткості пружини.

Для процесу моделювання механічної моделі МЕМС-акселерометра в Matlab/Simulink наведемо вихідні дані з урахуванням основного рівняння динаміки МЕМС-акселерометра (3.1).

Для розглянутого прикладу використані наступні вихідні дані: інерційна маса $m=3\text{кг}$, початкова швидкість $\dot{y} = 0$ м/с, початкове переміщення $y = 0$ м, коефіцієнт демпфування $c = 2,5$, коефіцієнт жорсткості пружини $k = 3,5$ і одинична функція $f(t) = 1$.

Для проведення моделювання досліджуваної механічної системи необхідно розглянути складові рівняння у дужках, а отже, існує три сигнальних лінії входу: $f(t)$, \dot{x} та x , які помножуються на певні константи. В програмному пакеті Simulink для керування процесу побудови Simulink-моделі створені графічні модулі, що можуть бути використані для збирання структурних схем систем, що досліджуються. Усі коефіцієнти, які є у рівнянні динаміки механічної системи МЕМС-акселерометра, враховані в Simulink-моделі, задаються в програмному середовищі Matlab/Simulink у відповідних блоках.

Параметри вхідного сигналу системи задаються за допомогою блоків типових джерел сигналів одиничної функції або гармонійного сигналу (блок Sine Wave).

Для реалізації частини виразу (3.2), $[f(t) - c\dot{x} - kx]$, необхідно зібрати фрагмент розроблюваної структури. У середовищі Simulink множення на константу, зокрема c і k здійснюється за допомогою підсилювача - блоку Gain. Далі сигнали підсумовуються за допомогою підсумовуючого блоку (рис. 3.5).

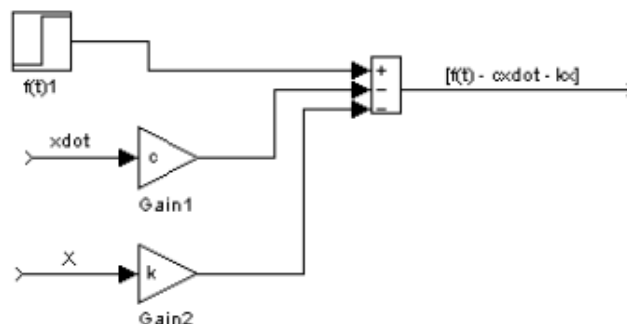


Рисунок 3.5 – Фрагмент Simulink-моделі підсумовування сигналів входу

Далі вираз $[f(t) - c\dot{x} - kx]$, необхідно помножити на коефіцієнт $1/m$, що реалізується включенням блок множення Gain у структуру. Далі в структурі використовуються інтегратори, які здійснюють подвійне інтегрування вхідного сигналу \ddot{x} для отримання вихідного сигналу x (рис. 3.6).

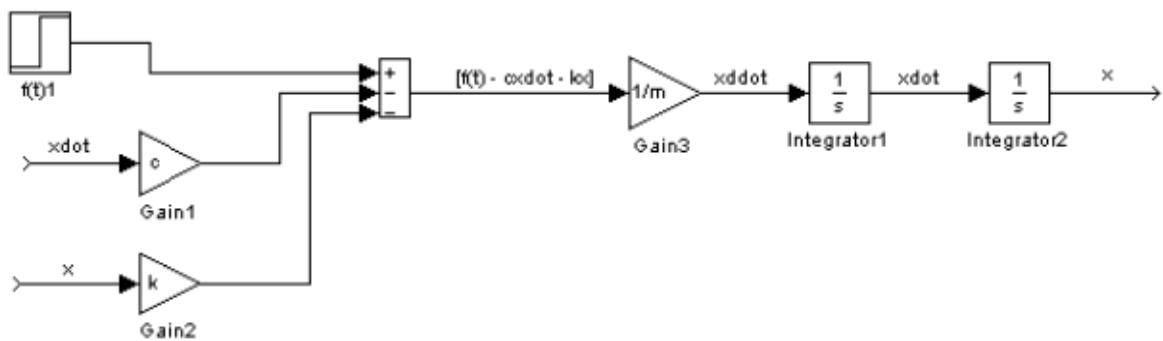


Рисунок 3.6 – Фрагмент Simulink-моделі з підсилюванням та подвійним інтегруванням вихідного сигналу

В Simulink-моделі сигнали \dot{x} і x є входом та виходом даної моделі. Тому необхідно ввести в структуру зворотний зв'язок, який необхідний для обох сигналів і побудувати замкнену структуру для кожного з цих сигналів. Зворотний зв'язок необхідний для того, щоб забезпечити кращі характеристики системи. Отримана модель показана на рис. 3.7.

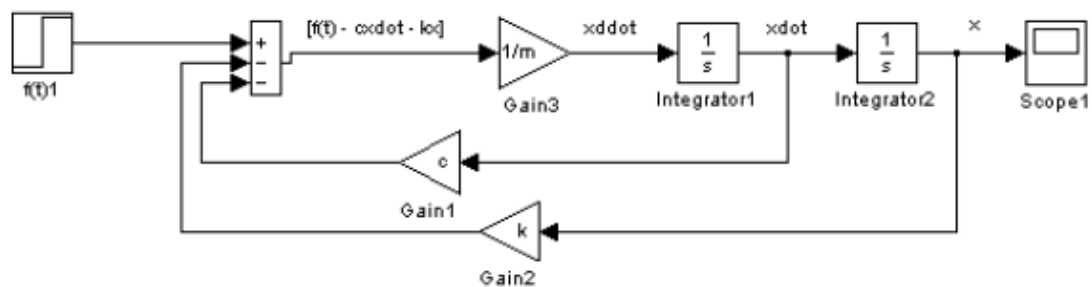


Рисунок 3.7 – Simulink-модель механічної системи МЕМС-акселерометра

На рис. 3.8 приведено результат моделювання переміщення інерційної маси в MEMC-акселерометрі. Механічна модель MEMC-акселерометра описується коливальною ланкою. З рисунка видно, що система, що досліджується генерує певний загасаючий коливальний відгук, тому система є «критично-демпфованою».

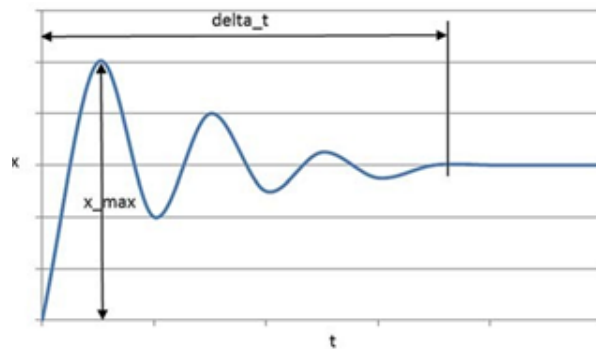


Рисунок 3.8 Характеристика переміщення інерційної маси

Оскільки система затухає в першому періоді, вона досягає найбільшого максимуму x_{max} . Цей факт є надзвичайно важливим з точки зору геометричних розмірів окремих частин акселерометра, і його слід враховувати, щоб уникнути їх деградації. Іншим параметром, важливим з точки зору застосування пристрою, є час перехідного процесу - стабілізації переміщення Δt , який має бути якомога коротшим, оскільки воно впливає на швидкість реакції сенсора. Враховуючи вищесказане, конструкція геометрії сильно орієнтована на оптимізацію як часу стабілізації, так і амплітуди зміщення.

3.4 Simulink-модель сенсорного елемента MEMC-акселерометра

В роботі було розроблено Simulink-модель сенсорного елемента MEMC-акселерометра.

Розглянемо сенсорний елемент МЕМС-акселерометра, що вбудований у силовий контур певного зворотного зв'язку. Механічний сенсорний елемент акселерометра, має опис його динаміки у вигляді диференціального рівняння другого порядку. Припустимо, що діапазон переміщення інерційної контрольної маси m обмежений механічним стопером. Стопер має відхилення від деякого положення спокою перед тим, як почати моделювання.

Сигнал входу представляє собою зовнішню інерційну силу, що впливає на чутливий елемент (інерційну контрольну масу), а сигналами виходу є сигнали переміщення, швидкості та прискорення маси. Сигнали виходу є реакцією на сигнал входу – силу інерції. Simulink-модель сенсорного елемента акселерометра приведено на рис. 3.9. Simulink-модель містить модуль - контролер обмеження переміщення, що призначений для користувача. Даний контролер має два входи: вхід прискорення, який діє на сенсорний елемент та вхід зміщення (переміщення) інерційної контрольної маси.

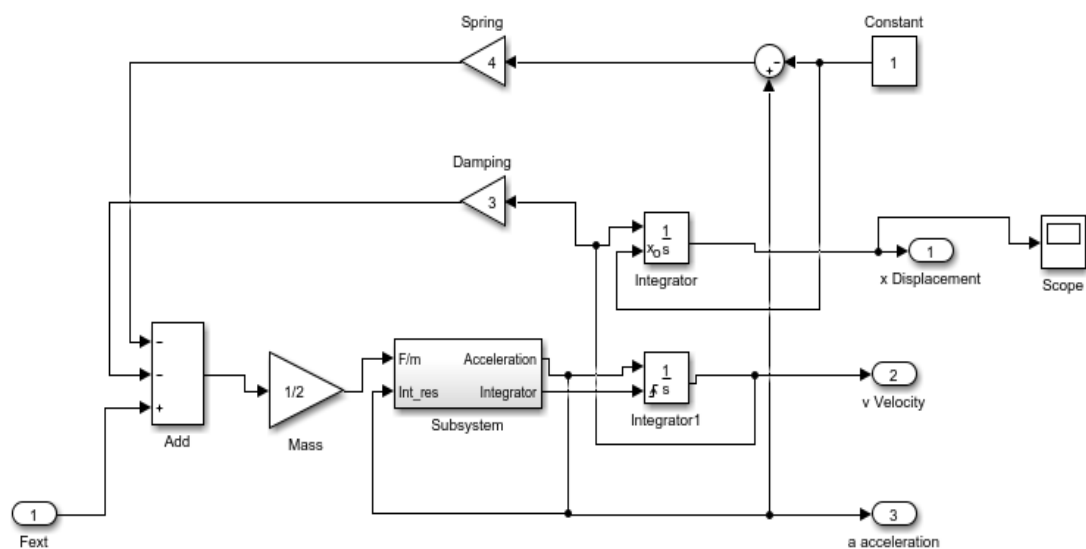


Рисунок 3.9 – Simulink-модель сенсорного елемента МЕМС-акселерометра

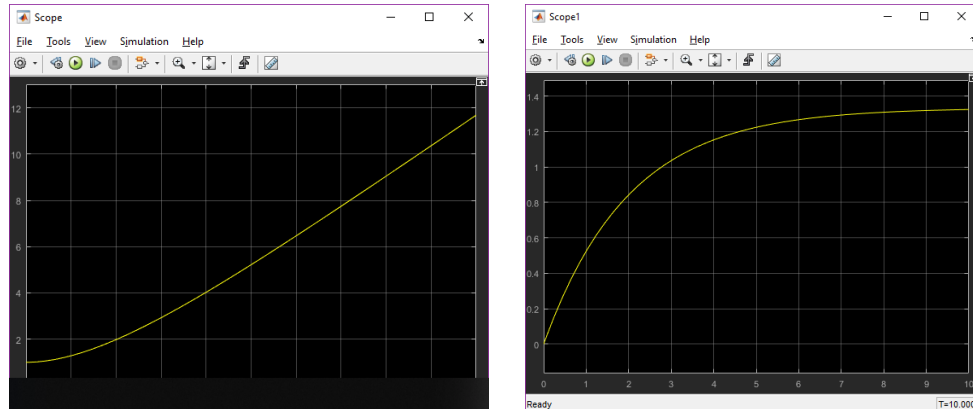
Даний модуль моделює нелінійну характеристику сенсорного елемента у тому разі, коли інерційна маса буде торкатися механічних стоперів. Тоді

зміщення перевищує деяке певне значення x_{\max} . Швидкість руху інерційної контрольної маси зменшується до нуля, тому блок Integrator1 обнуляється (скидається в нуль) до величини прискорення у напрямку віддаленому від обмежувача. В даній моделі нульове початкове зміщення інерційної маси може бути задане, як x_0 . Це означає початкову умову в схемі для другого інтегратора Integrator. Підсумовуючий блок на вході моделі підсумовує усі зовнішні та внутрішні сили, які діють на інерційну контрольну масу.

Simulink-модель сенсорного елемента як підсистеми сенсорної системи акселерометра включає контур управління, що має зворотний зв'язок по силі f . Модель описує динаміку сенсорного елемента, а також перехід від зсуву до ємності та напруги, блоки управління сигма-дельта модулятору та схеми зі зворотним зв'язком. В даній системі інерційна маса знаходиться між двома електродами ємнісного конденсатора і зміщення може бути перетворено у диференціальну зміну ємності. Зміна ємностей моделюється шляхом реалізації математичного функціонального блоку рівняння за допомогою паралельних ємностей електродів. Диференціальна ємність може бути порахована за допомогою певної електронної схеми вимірювання положення маси, яка представлена блоком посилення, за допомогою рівняння першого порядку. До складу моделі входять компаратор і блок для моделювання системи управління сигма-дельта модуляції. В структурі ланцюгу зворотного зв'язку розраховуються електростатичні сили, які діють на інерційну контрольну масу, коли один з двох електродів конденсатора включений. Сили зворотного зв'язку підсумовуються із зовнішньою силою інерції, яка чинить вплив на контрольну масу. Simulink-модель дозволяє оптимізувати параметри схеми: площу електрода, інерційну масу, постійну пружини. Модель дозволяє зробити прогноз стабільності контуру управління та отримати відношення «сигнал – шум».

Результати моделювання сенсорного елемента MEMS-акселерометра ADXL325 приведено на рис. 3.10, 3.11. Переміщення інерційної маси залежить від зовнішньої сили інерції. Чим більше сила інерції, тим більше

переміщення та швидкість та менше прискорення маси. Крива переміщення зростає та має нелінійний характер, що описується диференціальним рівнянням другого порядку руху інерційної маси.



а)

б)

Рисунок 3.10 – Графіки залежностей displacement-переміщення інерційної маси (а) та velocity-швидкості (б) від сили інерції

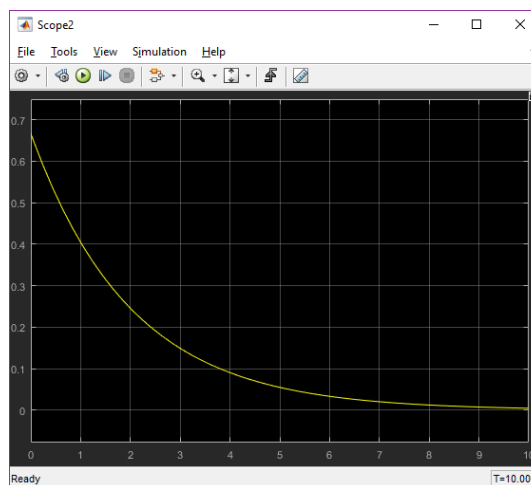


Рисунок 3.11 – Графік залежності acceleration – прискорення інерційної маси від сили інерції

3.5 Імітаційна Simulink–модель механічного компонента MEMС–акселерометра та результати поведінкового моделювання

На основі створеної Simulink–моделі механічної системи було розроблено імітаційну Simulink–модель механічного елемента ємнісного MEMС–акселерометра для дослідження впливу прискорення в системі, яка зображена на рис. 3.12, а також Simulink–модель механічного елемента для дослідження електричних параметрів зміни ємносей і напруги, приведена на рисунку 3.13. Було здійснено поведінкове моделювання розробленої Simulink–моделі.

Поведінкове моделювання в середовищі Simulink дозволяє виконувати системне моделювання в реальному часі.

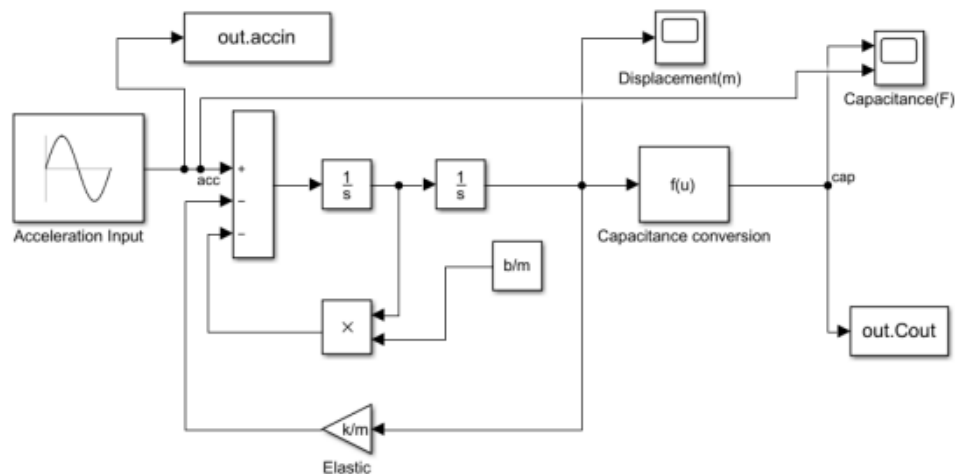


Рисунок 3.12 – Імітаційна Simulink–модель механічного елемента ємнісного MEMС-акселерометра при дослідженні впливу прискорення

В Matlab/Simulink було проведено дослідження поведінкової моделі механічного елемента ємнісного MEMС-акселерометра у двох режимах.

1. Вплив на механічний елемент MEMС-акселерометра постійного прискорення.

2. Вплив на механічний елемент МЕМС-акселерометра гармонійного (синусоїдального) прискорення.

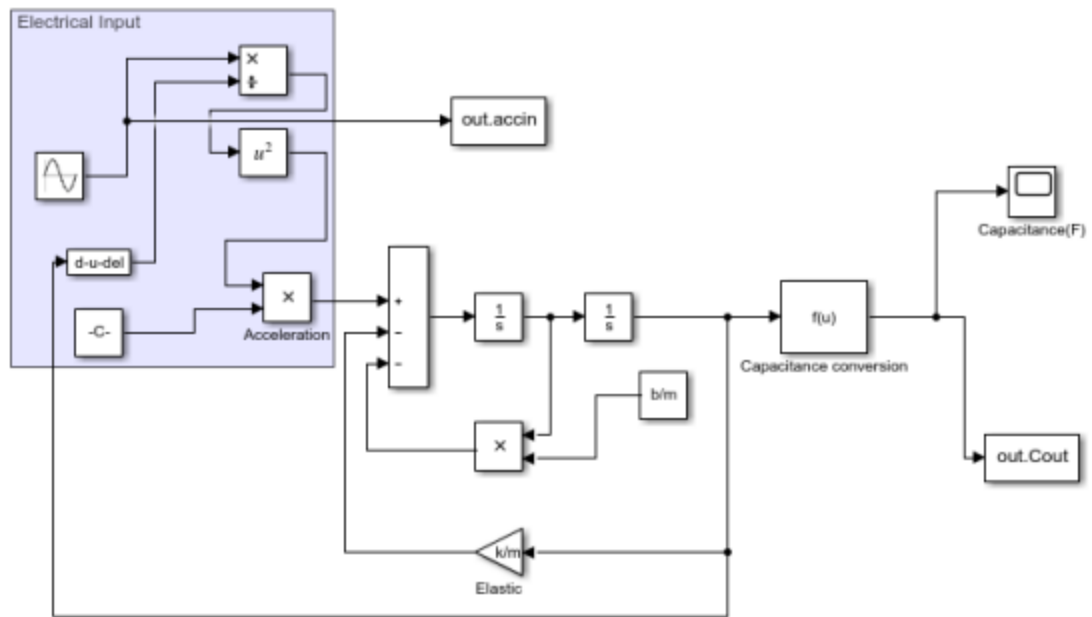


Рисунок 3.13 – Імітаційна Simulink–модель механічного елемента ємнісного МЕМС-акселерометра при дослідженні електричних параметрів

Результати поведінкового моделювання Simulink–моделі механічного компонента ємнісного МЕМС-акселерометра приведені на рис. 3.14 – 3.21. Подібні результати отримані в роботі [14]. На рис. 3.14 приведена перехідна характеристика системи.

Вплив на компонент ємнісного МЕМС-акселерометра постійного прискорення відповідає процесу поведінки моделі у статичному режимі. При впливі на механічний компонент МЕМС-акселерометра постійного прискорення на вхід системи подається одиничний сигнал - одинична ступінчаста функція $f(t)=1(t)$. Перехідний процес у системі є затухаючим.

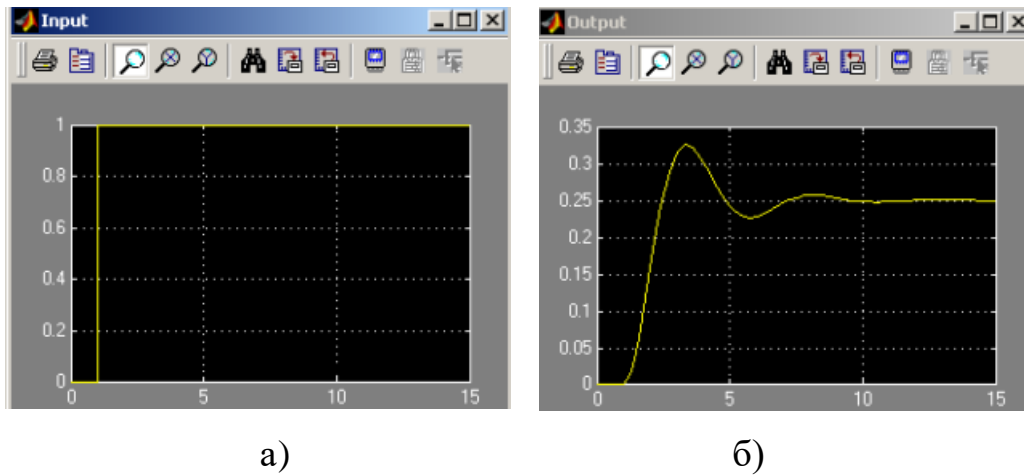


Рисунок 3.14 – Результати моделювання поведінкової моделі механічного компонента акселерометра: а – графік одиничної функції, б – графік перехідного процесу в системі другого порядку

Рис. 3.15 демонструє, що при дії постійного прискорення інерційна маса відхиляється на певний постійний кут, який пропорційний величині діючого постійного прискорення і описується аперіодичною ланкою 1-го порядку.

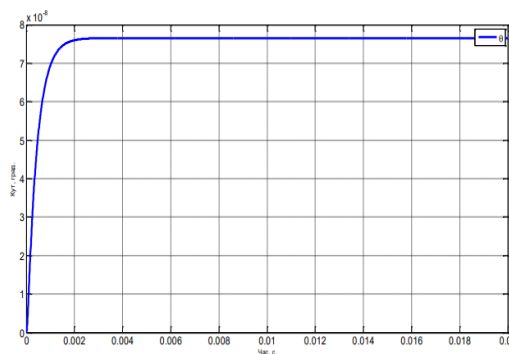


Рисунок 3.15 – Відхилення маси акселерометра при дії прискорення

На рис. 3.16 приведено результати моделювання: графік переміщення інерційної маси чутливого елемента акселерометра $x(t)$, що викликаний дією прикладеного гармонійного прискорення.

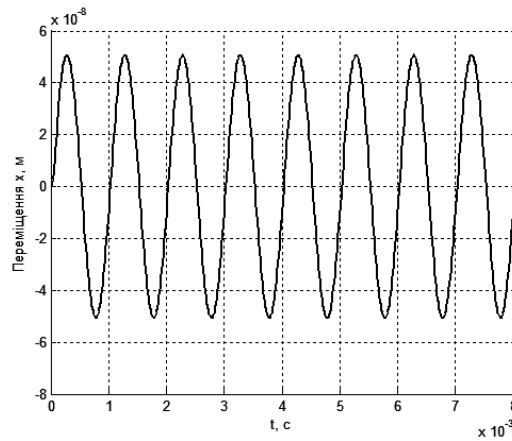


Рисунок 3.16 – Графік залежності переміщення чутливого елемента МЕМС-акселерометра $x(t)$, від прикладеного гармонійного прискорення

На рис. 3.17 приведено графік залежності швидкості чутливого елемента $v(t)$ від зовнішнього гармонійного прискорення. Графік залежності має гармонійний характер.

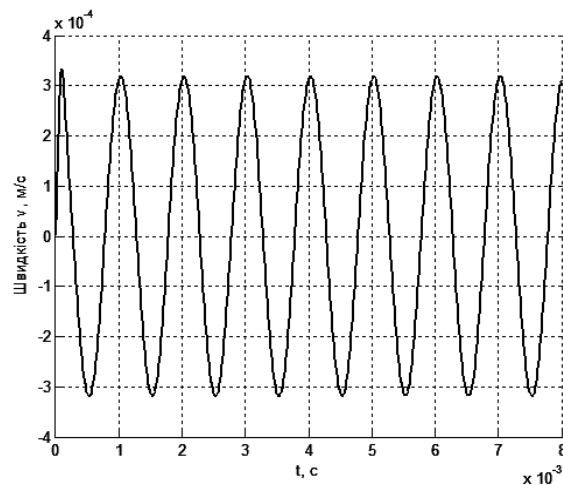


Рисунок 3.17 – Графік залежності швидкості чутливого елемента $v(t)$ від зовнішнього гармонійного прискорення

Графік залежності, приведений на рис. 3.18 показує відгук чутливого елемента інерційної маси при подачі на вхід Simulink-моделі сигналу синусоїдального прискорення та перехід чутливого елемента інерційної маси в рівновагу під дією прискорення

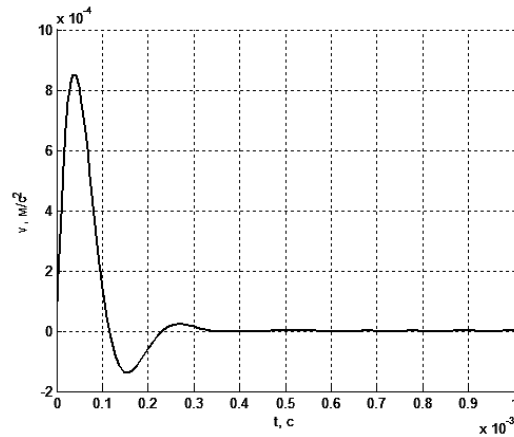


Рисунок 3.18 – Відгук сенсорного елемента на дію прискорення

Лінійний характер залежності переміщення сенсорного елемента від прикладеного прискорення в діапазоні амплітуди $\pm 5g$ зображено на рис. 3.19.

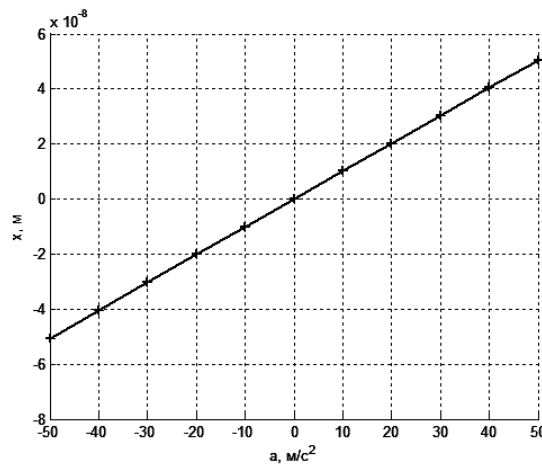


Рисунок 3.19 – Графік залежності переміщення чутливого елемента від прикладеного прискорення

На рис. 3.20 показано зміну ємності сенсорних конденсаторів при прискоренні $5g$, що знаходиться в межах $627,8 \dots 629,2$ pF. З рисунка видно, що одна величина ємності збільшується, а друга зменшується в залежності від прикладеного прискорення.

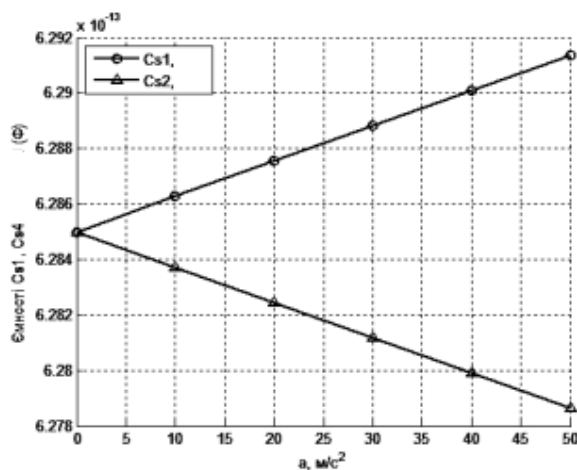


Рисунок 3.20 – Графік зміни ємності сенсорних конденсаторів

На рис. 3.21 показано моделювання вихідних напруг мікросенсора при синусоїдальній зміні прискорення з амплітудою 5 g.

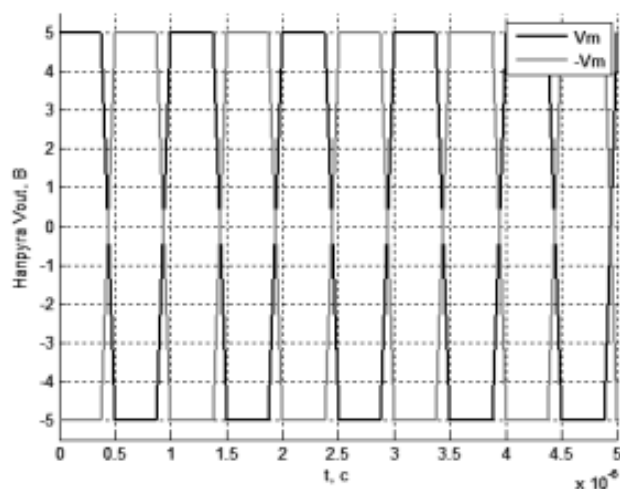


Рисунок 3.21 – Графік вихідних напруг чутливого елемента при синусоїдальній зміні прискорення

З отриманих результатів видно, що для заданих конструктивних параметрів механічного компонента диференціального ємнісного МЕМС-

акселерометра необхідні високоточні схеми для обробки таких малих змін вихідних сигналів.

ВИСНОВКИ

Мікроелектромеханічні акселерометри представляють собою інерційні МЕМС-сенсори, що представляють собою нероздільний комплекс механічної та електронної частин системи.

В кваліфікаційній роботі проаналізовано динаміку ринку МЕМС-пристроїв та інерційних сенсорів, що свідчить про її стійке зростання, розглянуто схему вбудованої мікросистеми, проаналізовано особливості та етапи проектування і виготовлення МЕМС-пристроїв. Етап розробки є важливим і включає аналітичне математичне моделювання за допомогою програмних пакетів ANSYS, Solid Works, Matlab. Виготовлення МЕМС-виробів здійснюється методом групової мікротехнології; що передбачає кристалльне продукування, складання модулів МЕМС; корпусування, тестування, а також вихідний контроль. Розглянуто класифікацію МЕМС-акселерометрів та проаналізовано типи мікромеханічних МЕМС-акселерометрів.

В роботі проаналізовано механічну схему та принцип дії осьового МЕМС-акселерометра, отримано диференційне рівняння динаміки лінійного акселерометра та передавальні функції механічної системи акселерометра по ланцюгу «прискорення – переміщення інерційної маси» і по ланцюгу «прискорення - вихідна напруга». Здійснено аналіз електричної моделі емнісного акселерометра, отримано формули електричних ємностей конденсаторів акселерометра та формулу залежності напруги на рухомих обкладинках конденсаторів.

Здійснено моделювання електромеханічної моделі МЕМС-акселерометра в середовищі Matlab Simulink. Розглянуто процедури моделювання акселерометрів.

Розроблено Simulink-модель механічної системи акселерометра та на її основі імітаційну модель механічного компонента емнісного МЕМС-

акселерометра була розроблена з використанням середовища Matlab/Simulink. На основі створеної моделі було проведено поведінкове моделювання чутливого елемента ємнісного МЕМС-акселерометра, отримано графіки залежностей, що підтверджують отримані математичні моделі акселерометра та аналіз статичних і динамічних характеристик чутливого елемента МЕМС-акселерометра.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Михайло Лобур, Михайло Мельник. Основи мікросистемних пристроїв. // Навчальний посібник: Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2016.– 258 с.
2. Andrabi Z. and Gupta K. A. Study and Analysis of Materials for Design of MEMS Capacitive Accelerometer. /Z. Andrabi and K. A. Gupta.// 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2018. – pp. 2183-2187.
3. Міщенко В.О. Моделювання компонентів керування МЕМС зі зворотними зв'язками з використанням Matlab/Simulink. /В.О Міщенко // 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 5. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – С. 294-296.
4. Szermer M., Amrozik P., Zając P., Maj C., Napieralski A. Capacitive MEMS accelerometer with open-loop switched-capacitor readout circuit. / M. Szermer, P. Amrozik, P. Zając, C. Maj, A. Napieralski // International Journal of Microelectronics and Computer Science, Vol 8. No4. – 2017.– pp. 139-145.
5. Alsalem A. and Zohdy M. Sensitivity Analysis of MEMS Accelerometer for the Vibration Measurement of VTOL UAV. / A. Alsalem and M. Zohdy. // 2023 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP), Nashville, TN, USA, 2023, pp. 320-325.
6. Jangra, M., Arya D. S., Khosla R. and Sharma S. K. Design and Simulation of Capacitive Z-axis MEMS Accelerometers using SU-8, PolySi, Si₃N₄, and SiC-based structural materials. / M. Jangra, D. S. Arya, R. Khosla and S. K. Sharma // 2020 5th IEEE International Conference on Emerging Electronics (ICEE), New Delhi, India, 2020, pp. 1-4.
7. Ivan Ivanov, Valeriy Skryshevsky. Application of Microsystems devices. Tutorial // Навчальний посібник: Київ. - 2016.– 374 с.
8. Філяшкін М.К. Мікроелектромеханічні системи. // Навчальний

посібник – К.: НАУ, 2019. – 276 с.

9. В.Теслюк, А.Зелінський, В.Каркульовський, Я.Василюк. Розширене проектування мікросистемних пристроїв: // Навчальний посібник, Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2016. – 200с.

10. S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White. MEMS Mechanical Sensors. // Artech House, Inc. Boston – London, 2007. – 281 с.

11. Kisabo A. B. Ordinary Differential Equations: MATLAB/Simulink Solutions / Aliyu B. Kisabo, C. A. Osheku, Adetoro M.A. Lanre, Aliyu Funmilayo A. // International Journal of Scientific & Engineering Research. – Volume 3, Issue 8. – 2012. – pp. 305-311.

12. Богомолов В.А., Гурко А.Г., Клименко В.И. и др. Моделирование систем управления в Simulink. // Учебное пособие: Харьков, ХНАДУ, 2018. – 220 с.

13. Коржик М.В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab. // Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів: Київ, НТУУ "КПІ", 2016. – 174 с.

14. Holovatyuy A., Teslyuk V., Panchak R., Koshyrets S. Mathematical modelling and simulation of the mechanical component of the fully differential capacitive mems accelerometer using matlab/simulink environment. / A Holovatyuy, V. Teslyuk, R. Panchak, S. Koshyrets // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. № 828 – 2015. – с. 20-26.

ДОДАТОК А Графічна частина кваліфікаційної роботи



Харківський національний університет радіоелектроніки

Кафедра АПОТ
Кваліфікаційна робота магістра

Імітаційна модель проектування інерційного MEMS-сенсора з використанням пакету Matlab/Simulink

Магістранта групи СКСм-22-2
Міщенко Владислава
Олександровича

Керівник:
доц. кафедри АПОТ
Ларченко Л.В.

Харків 2024

Актуальність

Аналіз сучасного стану техніки нових поколінь показує, що одним з найбільш глобальних науково-технічних напрямів, які бурхливо розвиваються серед систем, що реалізовані на мікрорівні, є мікросистемна техніка і створювані на її основі **мікроелектромеханічні системи (MEMS)**.

MEMS використовуються в широкому спектрі галузей, таких, як споживча електроніка, військова техніка, авіація, автомобілебудування, робототехніка, медицина та біотехнології. На даний постійно збільшується виробництво та номенклатура компонентів MEMS, зокрема сенсорів та актуаторів, які мають значну комерційну привабливість.

MEMS - це інтегровані мікропристрої найрізноманітніших конструкцій і призначень, які виконані за допомогою групової технології мікрообробки, що забезпечують багатофункціональність, інтелектуальність, високу технологічність, чутливість, надійність та низьке енергоспоживання.

Значну групу складають інерційні MEMS-сенсори, зокрема, акселерометри, які є одними з найбільш часто використовуваних сенсорів.

Процес проектування, аналіз та дослідження результатів поведінкового моделювання MEMS-акселерометрів є непростю задачею і передбачає широке використання сучасних засобів автоматизованого проектування, у тому числі і програмного пакету Matlab.

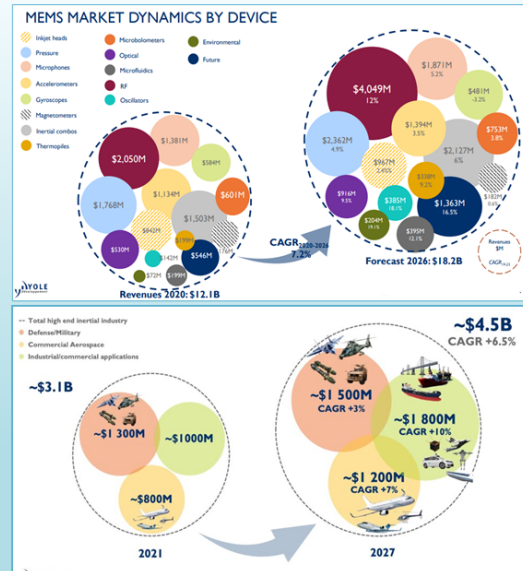
Динаміка зростання ринку MEMS-пристроїв та інерційних сенсорів

Згідно досліджень консалтингової компанії Yole Développement ринок MEMS та сенсорів і надалі буде зростати. На діаграмі зправа можна бачити, що сукупний середньорічний показник ринку MEMS складає 7,2% і показує його зростання з \$12,1 млрд. у 2020р. до \$18,2 млрд у 2026р, що пов'язано з ростом виробництва систем візуалізації, RF сенсорів (RADAR, LiDAR), сенсорів тиску, акселерометрів, гіроскопів та інерційних вимірювальних блоків, що є спільною комбінацією акселерометра і гіроскопа.

На рис. представлений огляд динаміки ринку інерційних MEMS-сенсорів для військової, аерокосмічної сфер, автомобілебудування та споживчої сфер. За оцінками, ринок інерційних сенсорів з 2021 року до 2027 року збільшиться з \$3,1 млрд. досягне \$4,5 млрд, що складає 6,5% сукупного середньорічного темпу зростання.

Провідними компаніями виробництва інерційних MEMS-сенсорів є американські компанії Analog Devices, Freescale Semiconductors та європейська компанія STMicroelectronics.

ХНУРЕ, кафедра АПОТ



3

Мета та задачі роботи

Мета роботи – розробка імітаційної моделі проектування та процедур моделювання MEMS-акселерометра в рухомих об'єктах з використанням математичного пакету Matlab/Simulink.

Задачі магістерської роботи:

- аналіз особливостей проектування, що включає в себе аналітичне математичне моделювання, та особливостей виготовлення MEMS;
- аналіз структури вбудованої системи; типів та видів сенсорних елементів сучасних MEMS-акселерометрів;
- аналіз механічної системи та розробка рівняння динаміки акселерометра;
- розробка електричної моделі MEMS-акселерометра;
- розробка Simulink-моделі механічної системи акселерометра за допомогою процедур моделювання;
- розробка імітаційної Simulink-моделі механічного компонента ємнісного MEMS-акселерометра
- поведінкове моделювання в Matlab/Simulink.

ХНУРЕ, кафедра АПОТ

4

Схема вбудованої системи



Вбудована система (Embedded System) - спеціалізована обчислювальна система, яка безпосередньо взаємодіє з фізичними об'єктами та процесами.

Вбудована система має у своєму складі **три основні компонента**:

- **чутливий елемент** або **сенсор**, що сприймає та реагує на зміну фізичної величини і перетворює в електричний сигнал;
- **мікропроцесорні системи обробки** інформаційних сигналів - пристрої передачі, оброблення сигналів, прийняття рішень. МП засоби здійснюють обробку вхідного цифрового сигналу згідно із заданим алгоритмом і включають у себе процесори, контролери, процесори сигналів, цифрові схеми.
- **Актуатор**, що є **виконуючим пристроєм**, призначений для приведення в рух необхідних механізмів.

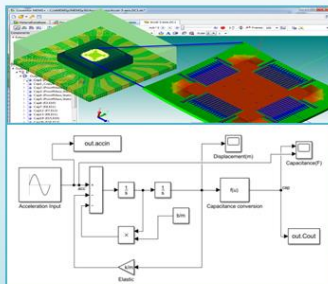
Особливості вбудованої системи:

- **робота в реальному часі** та **багатоцільність**
- **програмно-апаратний дуалізм**;
- **автономність роботи системи**;
- **високі вимоги до надійності систем**;

ХНУРЕ, кафедра АПОТ

5

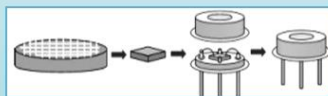
Особливості проектування та виготовлення MEMS



Кожен MEMS-виріб проходить етапи:

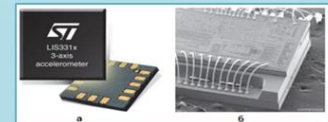
- **розробка**, що включає аналітичне математичне моделювання за допомогою пакетів прикладних програм, таких як **ANSYS, Matlab /Simulink**;
- **виготовлення** – кристалічне продукування мікроелементів та мікросхем, складання модулів систем;
- **тестування і випробування** (температурне та кліматичне);
- **вихідний контроль** виробу з остаточним тестуванням.

Під час проектування використовується класичне низхідне проектування, що передбачає декомпозицію процесу на розв'язання окремих задач. ВС поєднують електронну та механічну частини, які потребують окремого проектування та математичного моделювання з використанням засобів САПР.



Технологічна послідовність виконання корпусування окремого чипа MEMS приведена на рис.

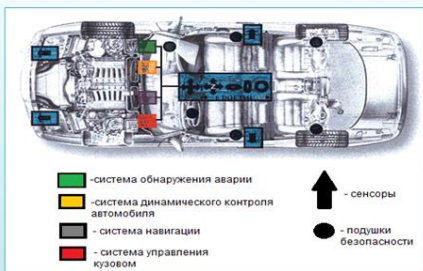
На рис. - приклад пластикової упаковки трьохосового MEMS-акселерометра фірми STMicroelectronics. Сенсорний елемент разом з ASIC розміщені в одному пластиковому корпусі.



ХНУРЕ, кафедра АПОТ

6

MEMS-акселерометри в транспортних засобах



В системах безпеки сучасних автомобілей застосовуються **інерційні MEMS-сенсори**. В центральній частині автомобіля встановлений інерційна вимірювальна система, що приймає та передає інформаційні сигнали в блок управління подушками безпеки, систему перекидання автомобіля, а також керує додатковими інерційними системами динамічного контролю транспортного засобу.

В системах виявлення перекидання автомобіля використовують **гіроскоп та трьохосьовий MEMS-акселерометр** для вимірювання поперечного прискорення.

Якщо автомобіль потрапляє на бордюр, ця подія може викликати його перекидання. При цьому вирогідність події зростає і при її наявності система визначає кут і швидкість нахилу автомобіля.

Акселерометр – пристрій, що призначений для вимірювання лінійних прискорень або відповідно до другого закону Ньютона сили, що викликає на прискорення інерційної маси.

Акселерометри складні пристрої і мають у своєму складі механічну та електричну складові.

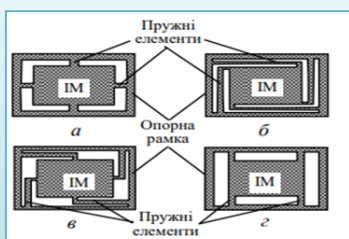
ХНУРЕ, кафедра АПОТ

7

Мікромеханічні осьові та маятникові MEMS-акселерометри

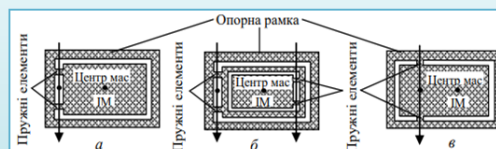
Мікромеханічні сенсори лінійних прискорень бувають двох типів:

Мікромеханічні осьові акселерометри



а – хрестоподібний, б – z-подібний косиметричний, в – симетричний, г – з паралельним підвісом

Мікромеханічні маятникові акселерометри



а – з одинарним маятником, б – з подвійним маятником, який містить пружні компоненти - балки, в – з одинарним маятником, який містить пружні компоненти - торсіїони

Осьові MEMS-акселерометри характеризуються **лінійним переміщенням інерційної маси IM** під дією зовнішнього лінійного прискорення. Основним конструктивним компонентом осьового акселерометра є опорна рамка і чутливий елемент, який включає IM та пружні елементи підвісу.

Маятникові MEMS-акселерометри характеризуються **кутовим переміщенням інерційної маси IM**.

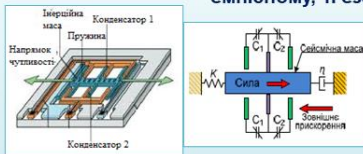
З'єднання ланок в структурі акселерометра може бути розімкненим або замкненим.

ХНУРЕ, кафедра АПОТ

8

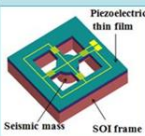
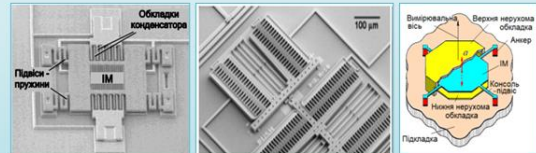
Сенсорні елементи в MEMC-акселерометрах

Сучасні акселерометри базуються на певних принципах дії чутливих елементів: **ємнісному, п'єзоелектричному та п'єзорезистивному.**



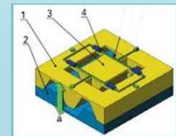
Принцип дії **ємнісного сенсора** заснований на зміні ємностей чутливого елемента з електродами при переміщенні інерційної маси (ІМ), під дією прискорення. В сенсорі 3 пластини: дві крайні закріплені, а центральна, що є ІМ, переміщується під дією сили інерції. Зміна відстані між пластинами призводить до зміни ємності конденсаторів.

На рис. - двохсхбові **ємнісні акселерометри** фірм Analog Devices, STMicroelectronic, в яких сенсор має конденсаторну архітектуру з повітряним діелектриком. Рухомі обкладки конденсатора мають зубчасту структуру. На 3-му рис. зображено акселерометр Freescale Semiconductor, що являє собою G-комірку - об'єднує в єдиному корпусі сенсор, схеми обробки сигналу та температурної компенсації.



П'єзоелектричні сенсори засновані на п'єзоелектричному ефекті. Під дією механічної сили на поверхні п'єзоматеріалу виникає електричний заряд, який є пропорційним зовнішній силі. Деформація матеріалу пропорційна швидкості переміщення ІМ, а отже і прискоренню

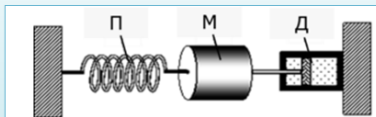
В **п'єзорезистивних сенсорах** чутливим елементом є мембрана з тензорезисторами, які з'єднані в мостову схему Уїтстона. Під дією тиску мембрана прогинається, тензорезистори міняють свій опір, що приводить до розбалансу моста. Опори залежать від ступеня деформації, що пропорційний величині швидкості переміщення ІМ, а отже і прискоренню.



ХНУРЕ, кафедра АПОТ

9

Механічна схема та рівняння динаміки осьового MEMC-акселерометра



Механічна схема складається з компонентів: чутливого **інерційного елемента (маса) М**, **пружного підвісу П** та **демпфера Д** для демпфування власних коливань чутливого елемента.

Принцип дії акселерометра заснований на вимірі сили інерції, що розвивається інерційною масою при її русі з прискоренням.

Основне рівняння динаміки акселерометра лінійних прискорень прямого вимірювання складено з урахуванням сил, що діють на інерційну масу чутливого елемента в перехідному режимі має вигляд:

$$m\ddot{x} + k_d \dot{x} + k_y x = m\dot{V}_{ix} \quad (1)$$

де m - маса чутливого елемента, x - відхилення інерційної маси від рівноваги; k_d - коефіцієнт демпфування в системі, k_y - коефіцієнт жорсткості пружного компонента, \dot{V}_{ix} - уявне прискорення інерційної маси.

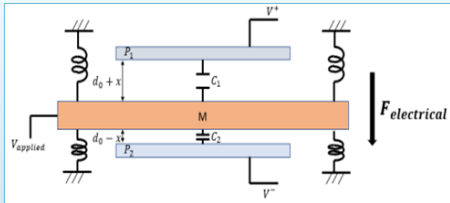
Передавальна функція механічної системи по каналу «прискорення - переміщення інерційної маси» має вигляд:

$$W(s) = \frac{X(s)}{V_{ix}(s)} = \frac{m}{ms^2 + k_d s + k_y} \quad (2)$$

ХНУРЕ, кафедра АПОТ

10

Електрична модель осевого MEMC-акселерометра



Рухомою обкладкою конденсатора переміщується на певну відстань x , **приріст напруги** dV на обкладці конденсатора, що рухається, лінійно залежить від переміщення dx між обкладками:

$$dV = \frac{q}{\epsilon S} dx \quad (3)$$

x - відстань між обкладками конденсатора MEMC-акселерометра;
 S - площа пластини електрода;
 q - заряд конденсатора;
 ϵ - діелектрична проникність матеріалу.

Електрична модель акселерометра містить три електрода.

Бічні електрода – статичні, а центральний електрод є рухомих і є інерційною масою M .

Для виміру ємностей, на електрода конденсаторів C_1 та C_2 подається напруга V , яка дає змогу вимірювати електростатичні сили F_1 та F_2 , які діють на рухому масу. У стані спокою ці сили рівні та компенсують одна одну.

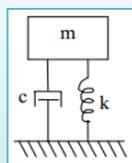
При переміщенні електрода, змінюються ємності C_1 та C_2 .

Електричні ємності C_1 та C_2 між нерухомими електродами і інерційною масою визначаються, як

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d_0 + x}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d_0 - x} \quad (4)$$

ϵ_0 - діелектрична проникність вакууму;
 d_0 - початкова відстань між обкладками конденсатора.

Математична модель механічної системи акселерометра



Механічна система з одним ступенем свободи вздовж вимірювальної осі.

Вихідні дані: $m = 3$ кг;
 початкова швидкість $\dot{x} = 0$ м/с ;
 початкове переміщення $x = 0$ м;
 коефіцієнт загасання $c = 2,5$;
 постійна пружини $k = 3,5$;
 зовнішня сила - функція $f(t) = 1$.

Рівняння динаміки механічної системи акселерометра має вигляд:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t) \quad (5)$$

де c – коефіцієнт демпфування (затухання);
 k – коефіцієнт жорсткості пружини.

Рівняння другого порядку містить складові: перша складова – сила інерції в системі, друга складова – сила демпфування, третя складова – сила тяжіння.

Реакція механічної системи акселерометра визначається **рівнянням руху, записаним відносно прискорення інерційної маси:**

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [f(t) - c\dot{x} - kx] \quad (6)$$

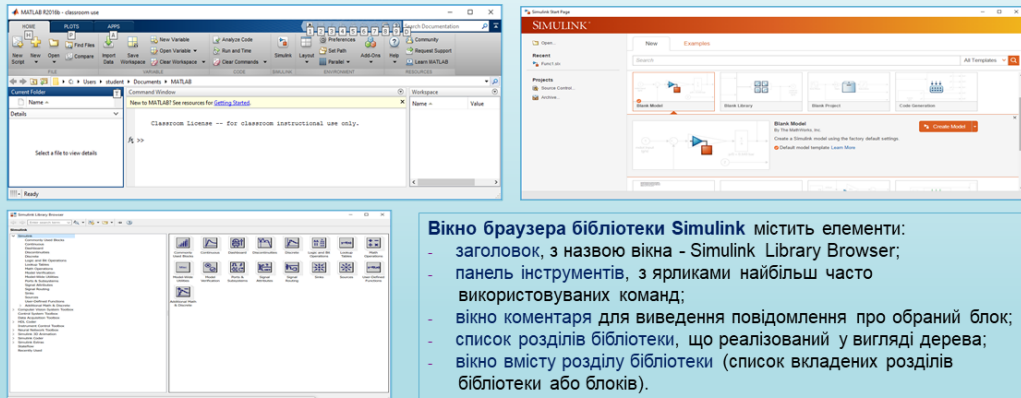
де \ddot{x} ($x\ddot{\cdot}$) – прискорення маси m ; \dot{x} ($x\dot{\cdot}$) – швидкість; x – переміщення, $f(t)$ – прикладена сила (вхідна функція); c - коефіцієнт загасання, k - постійна пружини.

Динамічна система, яка описується формулою (5), характеризується 2 параметрами: **переміщенням і швидкістю.**

В пакеті Simulink для створення моделей розроблені графічні модулі, що використовуються для складання структурних схем досліджуваних динамічних систем.

Matlab/Simulink для моделювання MEMС-сенсорів

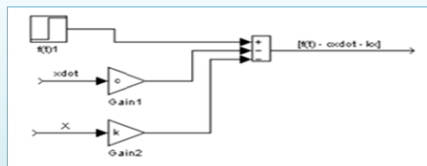
Система імітаційного моделювання **Simulink** є компонентом інтегрованого середовища інженерних розрахунків Matlab компанії MathWorks Simulink. Пакет **Matlab/Simulink** дозволяє здійснювати дослідження (моделювання у часі) поведінку динамічних систем і характеризується простотою і наочністю використання при моделюванні різних пристроїв і систем. У Simulink використовується **візуально-орієнтований підхід**, коли готові блоки за допомогою миші переносять з бібліотеки в вікно документа Simulink і з'єднують лініями входи і виходи цих блоків. В результаті отримуємо Simulink-модель проекту, яка запускається натисканням кнопки Run.



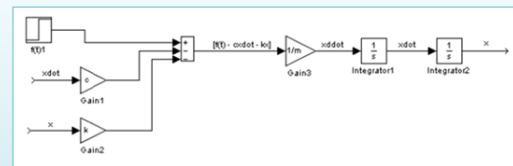
Вікно браузера бібліотеки Simulink містить елементи:

- заголовок, з назвою вікна - Simulink Library Browser;
- панель інструментів, з ярликами найбільш часто використовуваних команд;
- вікно коментаря для виведення повідомлення про обраний блок;
- список розділів бібліотеки, що реалізований у вигляді дерева;
- вікно вмісту розділу бібліотеки (список вкладених розділів бібліотеки або блоків).

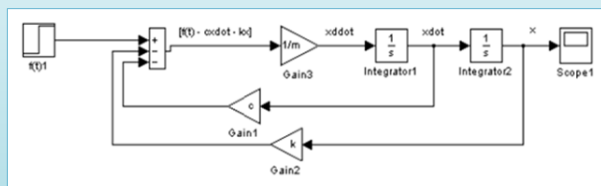
Simulink-модель механічної системи акселерометра



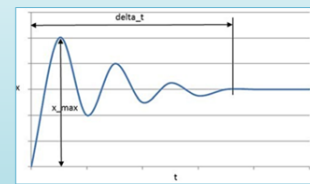
Фрагмент Simulink-моделі підсумовування вхідних сигналів входу $[f(t) - c\dot{x} - kx]$,



Фрагмент Simulink-моделі множення сигналів на константу $1/m$, та подвійного інтегрування



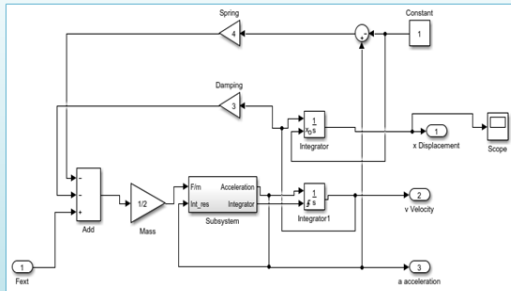
Simulink-модель механічної системи акселерометра



Характеристика переміщення інерційної маси

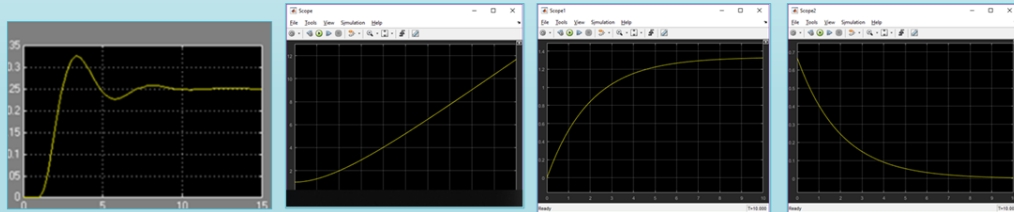
Механічна модель акселерометра може бути описана **коливальною ланкою**, система генерує загасаючий коливальний відгук на одиничний ступінчастий сигнал $f(t)=1(t)$. В моделі діапазон переміщення маси обмежений механічним демпфером, тому система є демпфованою. Система затухає в першому періоді, досягає найбільшого максимуму X_{max} . Час перехідного процесу – процес стабілізації переміщення маси δt має бути якомога коротшим, оскільки він впливає на швидкість реакції сенсора

Імітаційна Simulink-модель сенсорного елемента акселерометра та результати поведінкового моделювання



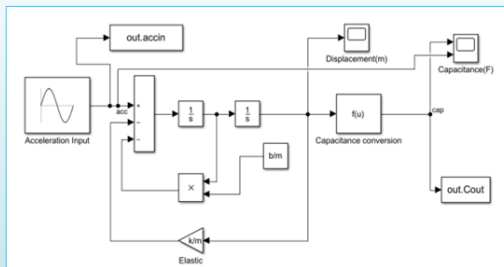
Імітаційна Simulink-модель сенсорного елемента містить модуль обмеження переміщення інерційної маси, що обмежує діапазон її переміщення за допомогою механічного стопора. Модуль обмеження має 2 входи: **вхід прискорення**, яке діє на сенсорний елемент та **вхід переміщення** інерційної маси.

Переміщення інерційної маси залежить від зовнішньої сили інерції $f(t)$. Якщо зростає сила інерції, то зростає переміщення та швидкість ІМ та є нелінійними, що описується диференціальним рівнянням другого порядку руху інерційної маси. Прискорення нелінійно зменщується під впливом сили інерції.



ХНУРЕ, кафедра АПОТ

Імітаційна Simulink-модель механічного компонента ємнісного MEMC-акселерометра та результати поведінкового моделювання.1

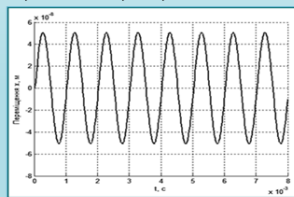


Simulink-модель механічного компонента ємнісного MEMC-акселерометра при дослідженні впливу гармонійного прискорення

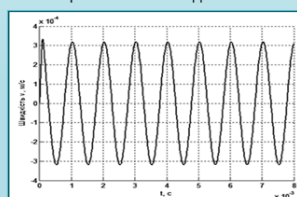
На рис. наведено результати моделювання сенсорного елемента MEMC-акселерометра ADXL325, з max амплітудою прискорення $\pm 15g$

Було досліджено вплив на механічний елемент ємнісного акселерометра гармонійного (синусоїдального) прискорення та отримано графіки залежностей.

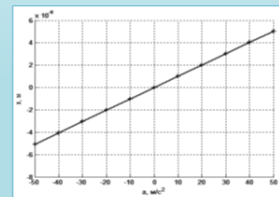
Графік переміщення інерційної маси чутливого елемента $x(t)$, що викликаний дією прикладеного гармонійного прискорення.



Графік залежності швидкості $v(t)$ від зовнішнього гармонійного прискорення. Графіки залежностей мають гармонійний вигляд.



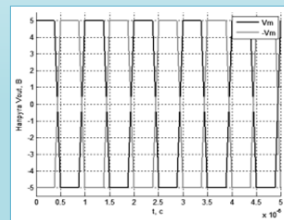
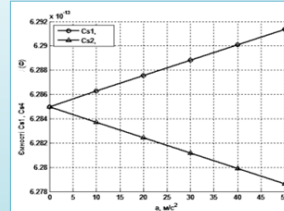
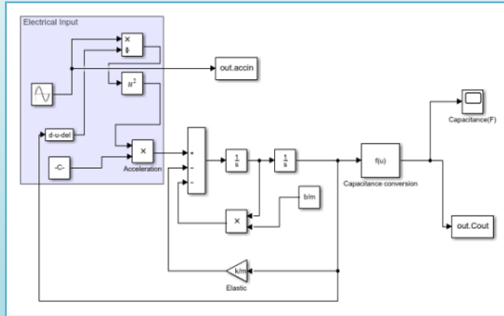
Графік залежності переміщення сенсорного елемента від прикладеного прискорення в діапазоні амплітуди $\pm 5g$ має лінійну характеристику.



ХНУРЕ, кафедра АПОТ

Імітаційна Simulink-модель механічного елемента ємнісного MEMC-акселерометра та результати поведінкового моделювання.2

При дослідженні впливу на механічний елемент ємнісного MEMC-акселерометра гармонійного (синусоїдального) прискорення було отримано графіки залежностей електричних характеристик.



На графіку показано зміну ємностей сенсорних конденсаторів при прискоренні 5g. З рисунка видно, що ємність C1 збільшується, а ємність C2 зменшується в певному діапазоні при переміщенні інерційної маси в залежності від прикладеного прискорення.

На графіку показано моделювання вихідних напруг мікросенсора при синусоїдальній зміні гармонійного прискорення.

ХНУРЕ, кафедра АПОТ

17

ВИСНОВКИ





- В кваліфікаційній роботі проведено аналіз особливостей проектування та виготовлення MEMC-сенсорів, що проходять стадії: **розробки з використанням засобів САПР, виготовлення, збірки модулів систем, тестування, випробування та вихідного контролю.**
- Розглянуто види сенсорних компонентів, що використовуються в сучасних MEMC-акселерометрах.
- Виконано аналіз **механічної системи** та отримано **рівняння динаміки акселерометра** лінійних прискорень з поступальним переміщенням сенсорного елемента, отримано передавальну функцію акселерометра по ланцюгу «прискорення – переміщення інерційної маси».
- Проведено аналіз **електричної моделі** ємнісного MEMC-акселерометра, отримано математичні формули електричних ємностей конденсаторів, формулу залежності приросту заряду від зміни відстані між пластинами конденсатора, яка має нелінійну характеристику та отримано формулу залежності напруги на рухомих пластинах конденсаторів від переміщення, яка має лінійну характеристику.
- Здійснено моделювання механічного компонента MEMC-акселерометра в середовищі Matlab/Simulink, розроблено процедури моделювання, розроблено **Simulink-модель механічної системи акселерометра та інерційну Simulink-модель механічного компонента ємнісного MEMC-акселерометра**, що має механічну та електричну складові.
- Проведено **поведінкове моделювання** розроблених Simulink-моделей, отримано графіки залежностей, що підтверджують отримані математичні моделі.

ХНУРЕ, кафедра АПОТ

18

Відомість кваліфікаційної роботи

«Імітаційна модель проектування інерційного MEMС-сенсора з використанням пакету Matlab/Simulink»

	Прізвище та ініціали відповідальної особи	Підпис	Дата
<p>Роботу виконав студент групи СКСм-22-2</p> <p>Структура кваліфікаційної роботи: – пояснювальна записка <u>68</u> с.; – графічний матеріал <u>18</u> арк..</p>	Міщенко В.О.		05.01.24
Керівник роботи	Ларченко Л.В.		05.01.24
Перевірка на плагіат здійснена. Оригінальність авторського тексту складає <u>96</u> %	Литвинова Є.І.		05.01.24
Нормоконтроль проведено :	Ларченко Л.В.		9.01.24