

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)

Моделі сенсорних MEMS-компонентів
на основі пакету Matlab/Simulink

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СКСм-21-1
Чуклін Н.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)

2022 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

Чукліну Назару Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделі сенсорних MEMS-компонентів
на основі пакету Matlab/Simulink

затверджена наказом по університету від " 14 " 11 2022 р. № 1478 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 21.12.2022

3. Вихідні дані до роботи

Математичний процесор MATLAB

Програмний пакет Simulink

Бібліотека Matlab/Simulink/Simscape

MEMS-акселерометр MMA7371LT

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1 Огляд сучасного стану мікросистемної техніки

2 Акселерометри в транспортних засобах

3 Фізична та електрична моделі MEMS-акселерометра

4 Моделювання MEMS-акселерометра в Matlab/Simulink

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 20 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	01.09.2022 - 02.09.2022	
2	Аналіз предметної області	03.09.2022 - 15.09.2022	
3	Аналіз джерел з проблемної галузі	16.09.2022 - 01.10.2022	
4	Розробка фізичної моделі акселерометра	02.10.2022 - 15.10.2022	
5	Розробка електричної моделі MEMC-акселерометра	16.10.2022 - 25.10.2022	
6	Розробка Simulink-моделі SDOF системи	26.10.2022 - 02.11.2022	
7	Розробка Simulink-моделі механічного компонента MEMC-акселерометра	03.11.2022 - 09.11.2022	
8	Моделювання в системі Matlab/Simulink	10.11.2022 - 18.11.2022	
9	Оформлення пояснювальної записки	19.11.2022 - 29.11.2022	
10	Оформлення графічного матеріалу	30.11.2022 - 11.12.2022	
11	Перевірка виконаного проекту керівником	12.12.2022 - 20.12.2022	

Дата видачі завдання 01 вересня 2022 р.

Студент 
(підпис)

Керівник роботи 
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 74 сторінки, 38 рисунків, 11 джерел за переліком посилань.

МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, ВБУДОВАНА СИСТЕМА,
АКСЕЛЕРОМЕТР, СЕНСОРНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ПРИСКОРЕННЯ,
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, MATLAB SIMULINK

В кваліфікаційній роботі розглянуто процедури моделювання мікроелектромеханічних акселерометрів в системах безпеки рухомих об'єктів з використанням математичного пакету Matlab Simulink.

Об'єктом дослідження є акселерометри в системах безпеки рухомих об'єктів. Предметом дослідження є моделі мікромеханічних акселерометрів в середовищі Matlab Simulink

Розроблено та проаналізовано фізичну та електричну моделі акселерометра. Здійснено моделювання електромеханічної моделі МЕМС-акселерометра в середовищі Matlab Simulink.

ABSTRACT

The explanatory note contains 74 pages, 38 figures, 11 sources by the list of references

MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, EMBEDDED SYSTEM,
ACCELEROMETER, SENSOR ELEMENT, ACCELERATION,
MATHEMATICAL MODELING, MATLAB SIMULINK

In the qualification work, the procedures for modelling microelectromechanical accelerometers in the safety systems of moving objects with the use of the mathematical package Matlab Simulink.

The object of the study is accelerometers in the safety systems of moving objects. The subjects of the study are micromechanical accelerometers models in the Matlab Simulink environment.

The physical and electrical accelerometer models have been developed and analyzed. The modelling of the electromechanical model of the MEMS accelerometer in the Matlab Simulink environment is carried out.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ.....	11
1.1 Дослідження ринку МЕМС пристроїв.....	11
1.2 Загальна структура мікросистеми.....	14
1.3 Постановка завдання дослідження.....	17
2 АКСЕЛЕРОМЕТРИ В ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ.....	18
2.1 Визначення та класифікація сенсорів	18
2.2 Використання сенсорних компонентів макро- та мікрорівня в автомобільній галузі	20
2.3 Акселерометри в системах автомобільної галузі.....	24
3 ФІЗИЧНА ТА ЕЛЕКТРИЧНА МОДЕЛІ МЕМС- АКСЕЛЕРОМЕТРА.....	30
3.1 Механічні сенсори сили.....	30
3.2 Класифікація МЕМС-акселерометрів.....	31
3.3 Механічна модель акселерометра лінійних прискорень.....	37
3.4 Математична модель акселерометра ємнісного типу.....	44
4 МОДЕЛЮВАННЯ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА В MATLAB/SIMULINK.....	48
4.1 Автоматизація проектування МЕМС.....	48
4.2 Matlab/Simulink для моделювання об'єктів.....	52
4.3 Моделювання мас-пружинної демпферної системи.....	55
4.4 Моделювання рівнянь другого порядку з одним ступенем свободи (Single Degree of Freedom System-SDOF).....	57
4.5 Поведінкове моделювання в системі Matlab Simulink.....	63

ВИСНОВКИ.....	72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	73
ДОДАТОК А Графічна частина кваліфікаційної роботи.....	75

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ANSYS – універсальна програмна система кінцево-елементного аналізу

BS (Embedded System) – вбудована система

IC – інтегральна схема

IoT (Internet of Things) – Інтернет речей

КД – кроковий двигун

MEMS (Microelectromechanical systems) – мікроелектромеханічні системи

MST – мікросистемна техніка

САПР – система автоматизації проектування

ТЗ – технічне завдання

ЧЕ – чутливий елемент

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

Matlab Simulink – інтерактивний інструмент (Програмне забезпечення) для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем

MST (Micro System Technology) – мікросистемні технології

SDOF system (Single Degree of Freedom system) – система з одним ступенем свободи

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

Solid Works – програмний комплекс САПР для автоматизації робіт промислового підприємства

TPMS (Tire pressure monitoring system) – система контролю тиску в шинах

ВСТУП

Мікроелектромеханічні системи (MEMS) представляють собою інтегровані пристрої, виконані за допомогою змішаної технології виготовлення інтегральних мікросхем та мікрообробки.

На сьогоднішній день світовий ринок MEMS надалі швидко зростає, спостерігається його активна динаміка, при цьому обсяг ринку MEMS щороку збільшується на 16%, так як компоненти MEMS і сенсори на їх основі мають велику комерційну привабливість.

MEMS об'єднують в собі певні компоненти: сенсори, виконавчі механізми - актюатори і електронні компоненти і характеризуються високим рівнем інтеграції. MEMS призначені для взаємодії з зовнішнім середовищем в режимі моніторингу, а також управління для досягнення мети отримання інформації про стан об'єкта і надалі формування керуючих впливів.

Сенсори та актюатори MEMS збирають інформацію з навколишнього середовища за допомогою вимірювання різних фізичних явищ, а отже, механічних, теплових, біологічних, а також хімічних, оптичних і магнітних явищ. Інформаційні сигнали, що отримують від сенсорів обробляються за допомогою електроніки, яка направляє їх на вхід актюаторів. Актюатори забезпечують переміщення, позиціонування, регулювання, накачування і фільтрації для досягнення поставлених цілей.

MEMS мають унікально малі розміри, масу, низьке споживання електроенергії, а також можливість функціонування часто в жорстких умовах експлуатації. Основними перевагами MEMS є надширока область використання висока функціональність, надійність, можливість досягти низьку вартість при великих або дуже великих обсягах виробництва, висока технологічність MEMS.

Сьогодні MEMS-сенсори динамічно розвиваються у науково-технічному напрямку та являють собою перспективні пристрої сучасної

мікросистемної техніки (МСТ). Створення MEMC-сенсорів та актюаторів визначило революційний процес в сучасній інерційній технології. Провідними виробниками MEMC акселерометрів є фірми Analog Devices, Motorola, Colibrus, STMicroelectronics, Freescale Semiconductor, BGelectronics.

MEMC містять надзвичайно малі механічні елементи, часто інтегровані разом із електронними схемами обробки. Однією з найважливіших категорій цих мікропристроїв є MEMS-акселерометр. MEMC-акселерометри являють собою інерційні сенсори, що є складними об'єктами МСТ, які представляють собою сукупність механічної та електричної частин системи. Надзвичайно широко використовуються MEMC-акселерометри в різних галузях застосування, а саме, в автомобілебудуванні, в приладах, що застосовуються у свердловинах, системах навігації для літальних апаратів різного призначення, маніпулятори для систем віртуальної реальності; в смартфонах, ноутбуках, цифрових відеокамерах, робототехніці, медицині, в промислових вимірювальних системах та системах управління. Основними параметрами акселерометра є діапазон вимірювань прискорень, поріг чутливості, коефіцієнт перетворення, амплітудно-частотні характеристики, статичні та динамічні похибки акселерометра.

В даний час для здійснення процесу проектування, а також аналізу та дослідження MEMC широко використовуються засоби Matlab. Програмний пакет Matlab/Simulink дозволяє здійснювати моделювання різних компонентів і систем MEMC, при цьому важливим є скорочення термінів проектування, підвищення якості розробки конкретних моделей і моделювання процесів, що відбуваються в системах. В даній кваліфікаційній роботі розглядаються процедури моделювання MEMC-сенсорних компонентів з використанням Matlab/Simulink.

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ

1.1 Дослідження ринку МЕМС пристроїв

На сьогоднішній день за рахунок ключових переваг мікропристроїв, які передбачають надійність, функціональність, точність, а також малі розміри і низьке енергоспоживання, МСТ продовжує стрімко розвиватися. МСТ застосовується у багатьох галузях, як для масового виробництва – побутової електроніки, автомобілебудування, так і в прецизійній техніці серійного виробництва: медичному обладнанні, робототехніці, військовій та авіаційній техніці.

МЕМС являють собою з'єднання механічних елементів, датчиків, а також приводів та електроніки на єдиній кремнієвій основі. МЕМС включає в собі ряд механічних мікроструктур, зокрема мікродатчиків, мікроактюаторів і мікроелектроніки, об'єднаних на кремнієвому чіпі. Тому МЕМС належать до інтегрованих систем, що поєднують у собі механічні, а також електричні компоненти [1]. МЕМС, як представники МСТ можуть бути представлені мініатюрними пристроями, а саме, пневмоклапанами, струменевими соплами принтерів, пружинами для підвіски головки вінчестера, мікроінструментами, мікромашинами, такими як мотори, турбіни, мікророботи, мікросенсори і виконавчі пристрої, аналітичні мікролабораторії на одному кристалі.

На сьогоднішній день світовий ринок МЕМС є таким, що швидко зростає і динамічно змінюється. Його обсяг щороку збільшується на 16%. Компоненти МЕМС і сенсори на їх основі мають велику комерційну привабливість. Так, згідно дослідженням французької консалтингової компанії Yole Development на ринку МЕМС пристроїв (рис.1.1) спостерігається стійке зростання з \$12,1В у 2020 році до \$18,2В в 2026 році, що становить 7,2% сукупного середньорічного темпу зростання.

На підставі досліджень ринку можна зробити висновок, що широкий спектр MEMC-сенсорів та актюаторів має вирішальне значення для реалізації робототехнічних інтелектуальних систем.

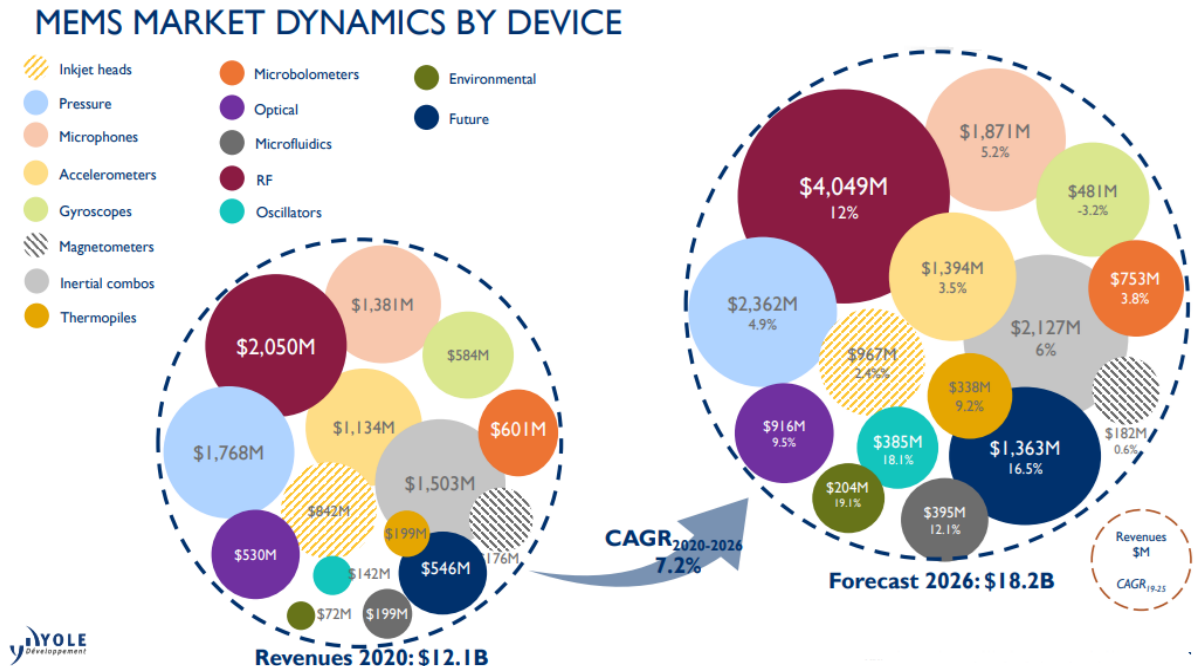


Рисунок 1.1 – Динаміка зростання ринку MEMC

Дійсно, MEMC складають 30% від загальної вартості ринку сенсорів та виконавчих механізмів. Серед різних MEMC-пристроїв спостерігається подальше зростання виробництва RF MEMS, оптичних MEMC, акселерометрів, гіроскопів, мікроструйних MEMC, мікрофонів, сенсорів тиску, осциляторів і MEMC для моніторингу навколишнього середовища.

Завдяки прогресу в індустрії MEMC та напівпровідникових сенсорів в поєднанні зі збільшенням обчислювальної потужності, MEMC застосовуються у системах доповненої та віртуальної реальності Augmented Reality/Virtual Reality, автономних транспортних засобах, 3D-зондуванні і зв'язку 5G.

MEMC використовуються там, де потрібні різноманітні сенсори положення, акселерометри, гіроскопи та інші сенсори подібного типу. По

мірі зростання популярності концепції «Інтернету речей» (IoT) потреба у пристроях MEMS все більше і більше зростає. Обсяги ринку MEMS в області споживчих пристроїв ростуть швидше, ніж в промисловій галузі, де дана технологія також дуже затребувана [2].

На рис. 1.2 представлений огляд динаміки ринку груп MEMS і класичних активних сенсорів для сфери споживання, медицини, автомобілебудування, індустрії та інших груп.

MEMS MARKET DYNAMICS FORECAST BY END-MARKET

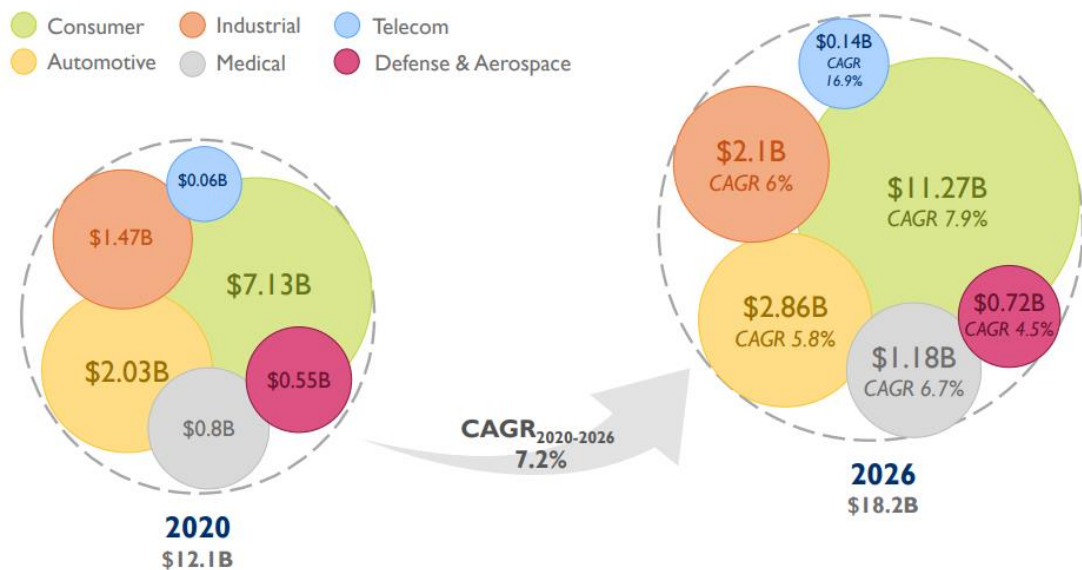


Рисунок 1.2 – Огляд динаміки ринку MEMS і сенсорів для сфер промисловості

За оцінками, ринок MEMS в автомобілебудуванні у 2020 році становив \$2,03 млрд. і очікується, що до 2026 року досягне \$2,86 млрд. В основному це пов'язано з ростом виробництва систем візуалізації, RADAR і LiDAR, акселерометрів, гіроскопів та сенсорів тиску [3].

Динамічний розвиток новітніх високоточних технологій дозволяє проектувати і виготовляти технічні системи мініатюрних розмірів різного призначення і об'єднувати в межах одного MEMS пристрою все більшу кількість функціональних можливостей.

Сьогодні нове покоління інтелектуальних сенсорів досить швидко замінює базові датчики по спектру галузей. Інтелектуальний сенсор включає в себе сенсорний елемент, схему аналогового інтерфейсу, інтерфейс шини та аналого-цифровий перетворювач, які вбудовані в єдиний корпус. Базові датчики можуть сприймати і передавати необроблені сигнали в зовнішню систему. На відміну від базового інтелектуальний сенсор розроблений з безліччю функцій. Функції представляють собою самоідентифікацію, самотестування, самоадаптацію. Інтелектуальні сенсори можуть забезпечувати вимір складних процесів та процес роботи в режимі реального часу. Інтелектуальні сенсори на сьогоднішній день є основним компонентом інформаційно-вимірювальної підсистеми, що є частиною МЕМС, які реагують на подразник ззовні та самі діють на об'єкт дослідження. При цьому дані сенсори сприймають і аналізують зміни, які виникають, здійснюючи статистичну обробку результатів вимірювань.

Сьогодні автомобільний сектор є найбільшим користувачем інтелектуальних сенсорів, який постійно зростає. Інновації та збільшення областей застосування різних інтелектуальних сенсорів також сприяють певному зростанню ринку. Інтелектуальні сенсори можуть бути використані для заміни майже всіх сенсорних функцій людини, тому в цьому сенсі можуть застосовуватись практично у всіх сферах життя.

1.2 Загальна структура мікросистеми

Сукупність мікроелектронних керуючих та функціональних виконавчих елементів і компонентів в єдиному конструктивному виконанні являє собою мікросистему.

В ланий час більшість обчислювальних систем є вбудованими. Вбудована система (ВС) представляє собою спеціалізовану обчислювальну систему, що взаємодіє з певними фізичними об'єктами, процесами.

ВС широко застосовуються в промисловій автоматичі, в транспортній промисловості, побутовій електроніці, телекомунікаційних системах, медичному обладнанні, а також в військовій, аерокосмічній галузі. Одними з найбільш складних об'єктів проектування є вбудовані системи реального часу, що характеризуються певним набором функцій. ВС мають постійний цикл взаємодії із зовнішнім середовищем, низьким енергоспоживанням, програмуванням, проектуванням в стислі терміни і мають відповідати вимогам безпеки та надійності.

ВС MEMS включають в себе функціональні модулі:

- сенсор (датчик, первинний вимірювальний перетворювач), що реагує на зміну фізичної величини і перетворює її в електричний сигнал;
- актюатор (виконавчий механізм). Пристрій, який приводить в рух механізми;
- керований механізм, який є фінальною ланкою ланцюга управління (мікродзеркальні пристрої та інші);
- пристрої передачі енергії, що призначені для передачі енергії (руху, електричного струму та ін.) від однієї ланки до відповідної іншої ланки;
- пристрої управління, що можуть бути електричні або механічні, призначені для приведення в дію відповідних актюаторів.

Загальна структура мікросистеми приведена на рис. 1.3. Система включає сенсор, який виконує функцію чутливого елемента. Він перетворює вхідні фізичні, хімічні та інші величини в електричний сигнал.

Сигнал, що отриманий з сенсора, є аналоговим сигналом. Модуль системи виконує функцію приведення аналогового сигналу до необхідного рівня підсилення, його мультиплексування з подальшим перетворенням його в цифрову форму за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Структура мікросистеми містить блок мікропроцесорних засобів (МП), які обробляють отриманий цифровий вхідний сигнал відповідно до заданого алгоритму.

Мікропроцесорна система після обробки отриманої інформації видає керуючий сигнал для актюатора, що перетворює енергію електричного сигналу в механічний рух. Елементна база ВС представляє собою електронні, механічні, оптичні та інші фізичні компоненти, а саме, процесори, мікроконтролери. Програмні засоби входять складовими до складу ВС.

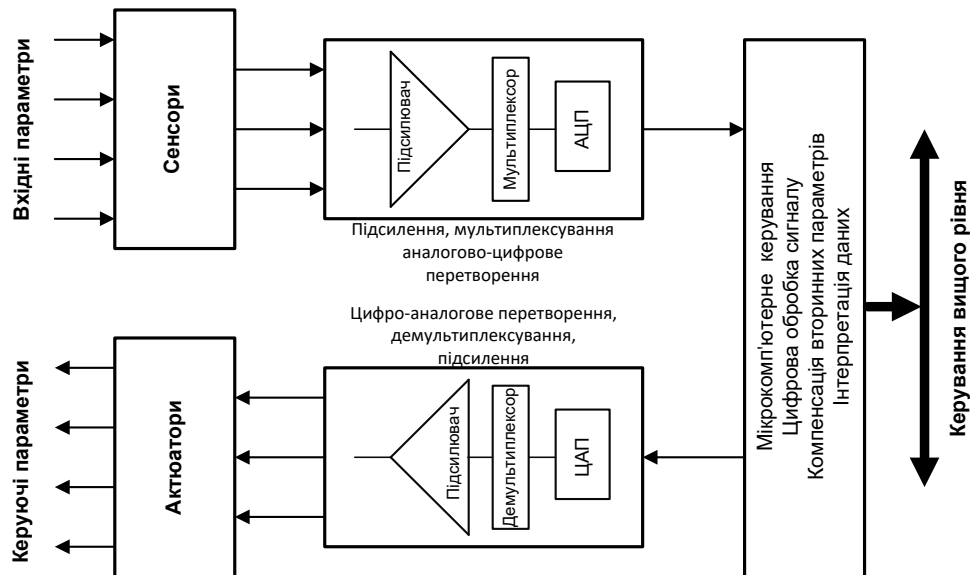


Рисунок 1.3 – Структура мікросистеми

МЕМС є інтегрованими системами і призначені для взаємодії з зовнішнім середовищем, яка здійснюється в режимі моніторингу та управління. Метою моніторингу та управління є отримання інформації про стан певного об'єкта управління і формування керуючих сигналів.

Генерація цифрового сигналу управління є вихідним інформаційним сигналом. Керуючий сигнал за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) перетворюється в аналогову форму. Надалі сигнал передається на пристрій розподілу аналогових і цифрових сигналів (аналогові комутатори, демультимплексори, буферні регістри та ін.). З пристроєм розподілу сигналів передається на актюатор. Потрібно зауважити, що макросистеми можуть включати в свою структуру мікросистеми або їх частини.

1.4 Постановка завдання дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є процедури моделювання MEMC-акселерометрів в системах безпеки рухомих об'єктів з використанням математичного пакету Matlab/Simulink.

Об'єктом дослідження є MEMC-акселерометри в системах безпеки рухомих об'єктів.

Предметом дослідження є моделі мікромеханічних акселерометрів в середовищі Matlab/Simulink.

До завдань дослідження входять:

- аналіз особливостей розробки MEMC, що включає в себе аналітичне математичне моделювання;
- аналіз загальної структури мікросистеми;
- аналіз принципів роботи MEMC-акселерометрів в рухомих об'єктах;
- розробка та аналіз фізичної моделі акселерометра;
- розробка та аналіз електричної моделі акселерометра;
- моделювання електромеханічної моделі MEMC-акселерометра в середовищі Matlab/Simulink.

2 АКСЕЛЕРОМЕТРИ В ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

2.1 Визначення та класифікація сенсорів

Сенсори являються важливими компонентами багатьох систем МЕМС. З їх допомогою отримують інформацію про певні параметри системи, які контролюються. Сенсор представляє собою пристрій, який перетворює фізичну величину, що контролюється, а отже, температуру, силу світла, частоту в електричний сигнал. При цьому, електричний сигнал зручний для вимірювання, передачі, зберігання, а також обробки, реєстрації, а іноді і для впливу їм на керовані процеси.

Призначення сенсорів – перетворення фізичної величини (електричної або неелектричної) в електричний сигнал, може бути далі посилений, перетворений, а також виміряний за допомогою електронних пристроїв і / або переданий по лініях зв'язку. Вихідними сигналами сенсорів можуть бути напруга, струм або заряд, які описуються такі характеристики: амплітуда, частота або цифровий код [4].

Кожен сенсор характеризується набором вхідних параметрів будь-якої фізичної природи і набором вихідних параметрів. Принципи дії сенсорів можуть бути самими різними в залежності від фізичної природи вимірюваної величини, її абсолютного значення, необхідної точності перетворення. Проте перетворення вхідних фізичних величин у відповідні вихідні сигнали пов'язано з перетворенням енергії, в тому числі і перетворенням одного виду енергії в інший.

За принципом перетворення енергії розрізняють активні і пасивні сенсори, що відрізняються способами, які формують сигнал і схеми підключення.

Активний сенсор генерує власний електричний сигнал і не вимагає додаткового джерела енергії у відповідь на зміну зовнішнього впливу на його виході завжди з'являється електричний сигнал. Прикладами активних датчиків є фотодіоди, п'єзоелектричні чутливі елементи, термопари і ін. Пасивний сенсор, який для своєї роботи вимагає джерело зовнішньої енергії, її називають сигналом збудження. При формуванні вихідного сигналу пасивний датчик тим чи іншим способом діє на сигнал збудження.

У активних сенсорах в результаті зовнішнього впливу, на виході з'являється різниця електричних потенціалів, які є безпосередньо вихідним сигналом. Значення опору відображає вимірювану температуру, яка може бути знайдена по відомим залежностям. Прикладом активних датчиків є резистивний тензодатчик, чиє електричний опір залежить від величини його деформації. Прикладами активних сенсорів є радар і лідар, якими вимірюється затримка в часі між випромінюванням і реєстрацією повернутого сигналу, таким чином визначаючи розміщення, швидкість і напрямок руху об'єкта.

За кількістю величин, які сприймаються та перетворюються, сенсори поділяються на одномірні сенсори (датчики), які оперують з одною вхідною величиною, та n-мірні (багатовимірні) сенсори, що сприймають кілька (n) вхідних величин.

Класифікація за способом детектування. Сенсори (датчики) можуть перебувати в безпосередньому контакті з об'єктом, тобто розташовуватися на поверхні або всередині об'єкта або не мати безпосереднього зв'язку з ним.

Сенсори, які не перебувають у безпосередньому зв'язку з об'єктом, називають безконтактними. У таких сенсорах обмін енергією між сенсором та об'єктом може здійснюватися за допомогою магнітного поля, ультразвуковим сигналом. До безконтактних також відноситься більшість оптичних і інфрачервоних датчиків наприклад інфрачервоні термометри і т.п. Контактні сенсори - це сенсори, які вимагають прямого контакту зі збудником. Наприклад, сенсори механічної напруги, датчики температури.

За кількістю виконуваних (вимірювальних) функцій сенсори бувають однофункціональні і багатофункціональні. Однофункціональні сенсори виконують основну функцію - сприйняття величини і формування вимірювального сигналу. Багатофункціональні можуть крім основної функції виконувати ряд додаткових функцій. Багатофункціональні сенсори іноді називають також інтелектуальними. До додаткових функцій багатофункціональних сенсорів можна віднести наступні: операції обробки даних і фільтрацію; корекцію похибок; зберігання сигналів та інші операції [5].

За фізичним принципом дії МЕМС сенсори поділяються на оптичні, фотоелектричні, індукційні, магнітоелектричні, ультразвукові; термоелектричні; термооптичні; резистивні; електромеханічні; магніторезистивні ємкісні; потенціометричні; індуктивні.

2.2 Використання сенсорних компонентів макро- та мікрорівня в автомобільній галузі

Існує два типи автомобільних сенсорних компонентів [6]:

- датчики типу plug & play, що представляють собою пристрої в захисному корпусі разом з автомобільними поєднувачами, що включають друковані плати, на яких розміщені сенсорні компоненти і електроніка;
- мікроелектронні сенсорні компоненти в корпусах з виводами для монтажу на друковану плату.

Ці пристрої відносяться до макрорівня (сенсорні пристрої та системи) і мікрорівня (мікроелектроніка та мікросистемотехніка, мікромеханіки і мікрооптики) відповідно.

Автомобільні сенсорні інновації на мікрорівні представлені МЕМС-компонентами: інтегральні датчики - мікромеханічні, магнітокеровані та інші мікросхеми, у вигляді спеціалізованих окремих ІС, мікромініатюрних датчиків і ASIC, розміщених на кристалах.

В автомобільній галузі використовуються сенсорні системи, які можна класифікувати за призначенням або типами пристроїв (датчики положення, температури, прискорення, тиску), технологіям (CMOS, MEMS, індуктивні датчики), застосуванням (ESC, системи безпеки або контролю і управління двигуном).

Інтегральна схема, модуль, плата можуть одночасно виконувати і кілька сенсорних функцій, тобто об'єднувати кілька сенсорних пристроїв, і входити в кілька різних автомобільних систем (мережева концепція).

Розвиток нанотехнологій призвело до їх проникнення в транспортну галузь і автомобільну сенсоріку. Інтеграція нанотехнологій і MEMS в макросистеми дозволяє виробляти і використовувати «розумні» матеріали, обладнання й системи наступного - нанорівня.

Новий автомобіль може включати не менше 100 сенсорів як макропристроїв з друкованими платами і автомобільними поєднувачами, що входять до складу автомобільних систем [2].

Сенсорні рішення для систем powertrain і вихлопних систем є датчики руху, температури, інтелектуальні датчики з інтегрованою електронікою, що допомагають зберігати паливо. Основне призначення подібних пристроїв - оптимізація функціональних характеристик двигуна, забезпечення необхідних рівнів емісії .

Системи електронного контролю процесів згоряння вимагають детектування великого числа параметрів. Наприклад, датчик BERU RIS (Radiator Identification Sensor) використовується для детектування і функціональних випробувань каталітичного покриття радіатора (рис. 2.1,а). Датчик характеризується наявністю вбудованої електроніки. Крім того, він вимірює температуру охолоджувача.

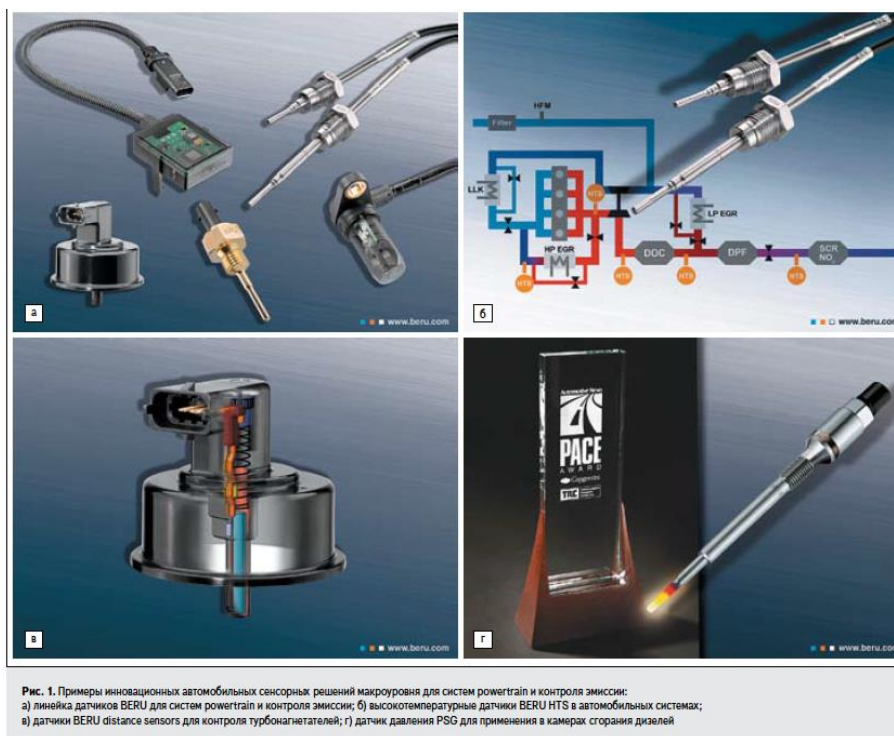


Рис. 1. Примеры инновационных автомобильных сенсорных решений макроуровня для систем powertrain и контроля эмиссии: а) линейка датчиков BERU для систем powertrain и контроля эмиссии; б) высокотемпературные датчики BERU HTS в автомобильных системах; в) датчики BERU distance sensors для контроля турбоагнетателей; г) датчик давления PSG для применения в камерах сгорания дизелей

Рисунок 2.1 – Приклади сенсорних рішень

Компанія BERU виробляє широку лінійку датчиків температури, датчики швидкості (індуктивного типу і датчики Холла з функцією напрямку), датчики відстані і положення, що функціонують також на основі ефекту Холла, датчики середовищ (води і дизельного палива), датчик тиску в камерах згоряння для дизельних двигунів, лямбда-зонд і системи контролю тиску шин.

Високотемпературні датчики BERU HTS (рис. 2.1,б) використовуються для контролю температур в різних середовищах двигуна і трансмісії: палива, охолоджувача, масла, повітря (-40 ... + 160°C), вихлопних систем (-40 ... +1000 °C), у допоміжних радіаторах / нагрівачах (-40 ... + 600°C).

Принцип вимірювання температури заснований на включенні температурно-залежного резистора - NTC або тонкоплівкового платиного резистору. Платиновий сенсорний елемент HTS-датчика забезпечує високу вимірювальну точність і міцність і дозволяє вимірювати діапазон температур -40 ... 950°C.

Датчики положення BERU distance sensors (рис. 2.1, в) в турбонагнітачі вимірюють настройку пневматичних актюаторів, що регулюють лопати турбін. Завдяки модульній структурі вони швидко і ефективно адаптуються до будь-якої геометрії турбонагнітача. Датчики середовищ BERU Media sensors виконують функції виявлення і розрізнення різних середовищ. Датчики води, наприклад, визначають рівень води в паливних фільтрах, що допомагає в боротьбі проти корозії. Датчики дизеля вимірюють дози біодизельного і мінерального дизельного палива, їх основне призначення - диференціація палива і забезпечення відповідності рівням емісії.

Датчик тиску (Pressure Sensor Glow Plug, PSG) (рис. 2.1, г) призначений для дизельних автомобілів, до яких пред'являються вимоги значного зниження емісії сажі і NOx. Один із шляхів вирішення проблеми - оптимізація згоряння, і датчик PSG, виконуючи вимірювальні функції безпосередньо в камері згоряння, постачає необхідні дані ECU. Датчики систем powertrain сприяють оптимізації роботи двигуна і зниження емісії.

Безпека автомобіля забезпечується автомобільною сенсорною структурою нового покоління. Так, Autoliv з метою пом'якшення травм пішоходів розробила проект PIMS на основі інфрачервоних мікроболометрів. Інновації компанії включають FIR (Far InfraRed, чутливу до довгих ІК-хвилях) систему нічного бачення Night Vision 2 з функцією виявлення пішоходів на основі покращеної технології камер, подушки безпеки для пішоходів на активному капоті, який піднімається.

Автомобільні сенсорні інновації на мікрорівні представлені MEMS-компонентами: інтегральні датчики - мікромеханічні, магнітокеровані і інші мікросхеми, спеціалізовані модулі для обробки сигналу у вигляді окремих ІС, мікромініатюрних датчиків і ASIC, розміщені на кристалах. Автомобільні MEMS включають датчики інерції (акселерометри, гіроскопи, блоки інерційних вимірювань), датчики тиску, інфрачервоні датчики. Ці мініатюрні пристрої виробляються здебільшого у вигляді корпусованих ІС з виводами для монтажу на друковану плату. Малий розмір в поєднанні з високою

функціональністю, надійністю, низькою ціною і іншими перевагами, в залежності від типу датчика, зумовили їх широке застосування для виконання багатьох автомобільних контрольних і керуючих функцій - від систем розгортання подушок безпеки при детектуванні аварії і моніторингу тиску шин до управління двигуном.

Системи інфрачервоного бачення в діапазоні довгих ІК-хвиль (FIR) дозволяють отримати висококонтрастні зображення теплих, переважно живих об'єктів (людей, тварин) на відстані близько 150 м.

2.3 Акселерометри в системах автомобільної галузі

Акселерометри відіграють велику роль у навколишньому світі. Є безліч застосувань, в яких вони використовуються.

Автомобільна галузь застосування акселерометрів сконцентрована в області безпеки, комфорту пасажирів, динамічного тест-контролю автомобіля, інерціальних гальмівних вогнів, нівелювання дальнього світла фар, виявлення перекидання, автоматичних дверних замки, сенсорах контролю емісії і включає наступні основні області завдань:

- виявлення аварії, активація систем безпеки виявлення і контролю розгортання бічних подушок безпеки (Crash detection, Airbag deployment systems, Restraint systems global);
- детектування крену (Rollover detection), бічних аварій і перекидань;
- аварійні випробування (Crash-tests level), в тому числі для оснащення манекенів;
- адаптивний круїз-контроль (Adaptive Cruise Control);
- антиблокувальна система коліс при гальмуванні (ABS - Anti-lock braking system);
- системи охоронної сигналізації (Burglar Alarm) в протиугінних системах (Antitheft Systems);

- системи транспортної навігації (Vehicle Navigation Systems) и GPS (Global control Positioning System);
- контроль нерівності дороги;
- спостереження за тиском в шинах (Tire Pressure Monitoring);
- сенсорний кластер (Sensor Cluster) - блок інерціальних вимірювань.

«Inertial measurement unit» (IMU) з шістьма ступенями свободи, наявний орієнтовно в центрі автомобіля для збору інформації для всіх інерційних систем.

На сьогоднішній день, інерційні датчики MEMS застосовуються в аварійних сенсорах автомобілів для контролю подушок безпеки. В цьому випадку акселерометр безперервно вимірює прискорення автомобіля. Коли прискорення перевищує зумовлену межу, мікроконтролер обчислює інтеграл прискорення для визначення, чи відбулася зміна в швидкості. Якщо відбулась зміна в швидкості, подушка безпеки буде запущена. Рішення запустити передні подушки безпеки повинно бути прийнято в десятках мілісекунд; рішення запустити бічні подушки безпеки повинно бути прийнято ще швидше, тому що автомобільні двері знаходяться ближче до водія і пасажирів, ніж кермо або приладова панель. Реакція відбувається миттєво, що стається буквально вибух. Для повного розкриття мішку, треба всього лише 30-50 мілісекунд, а швидкість пострілу подушки доходить до 322 км / ч.

MEMS-акселерометри - основні сенсори прискорення в модулях подушок безпеки, які встановлені в центральній консолі. Завдяки цьому досягнуте збільшення надійності, і скорочення вартості систем подушок безпеки. Великий плюс MEMS-акселерометрів в тому, що вони можуть виконати надійне самотестування, дозволивши процесору модуля подушок безпеки визначити, чи надійні дані датчики або модуль подушки безпеки потребує доопрацювання.

MEMS акселерометри і гіроскопи застосовуються для детектування фронтальних аварій, в системах ESC, TPMS. Існують датчики витрат, ІК-датчики (мікроболометр для систем нічного бачення і термопари моніторингу всередині кабіни). Для допоміжних подушок безпеки використовуються ультразвукові MEMS-датчики.

На сьогоднішній день, в повнофункціональних автомобілях використовуються різноманітні інерційні сенсори, які на рисунку позначені стрілками (рис. 2.2).

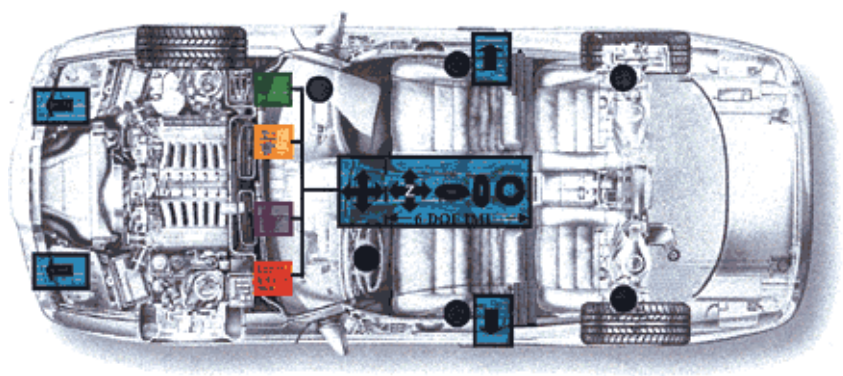


Рисунок 2.2 – Розташування MEMS-сенсорів в системах безпеки автомобіля

Використання MEMS-сенсорів як єдиної системи, розташованих в центрі автомобіля, вимагає меншу кількість пристроїв, для надання інформації, яку запитують різні підсистеми (наприклад, система безпеки і система навігації). Цей метод стає метою багатьох автомобільних виробників.

Число інерційних сенсорів MEMS, які використовуються в автомобілях, істотно зростає. У деяких випадках в одному транспортному засобі використовується певна кількість інерційних сенсорів (акселерометри і гіроскопи). Багато автомобільних виробників приймають концепцію використання кластера інерційних сенсорів для передачі інформації в будь-яку систему, яка цього потребує (рис. 2.3). На рисунку наведено позначення:

ПБ – подушка безпеки, АС – аварійна сигналізація, А – акселерометр, G – гіроскоп.

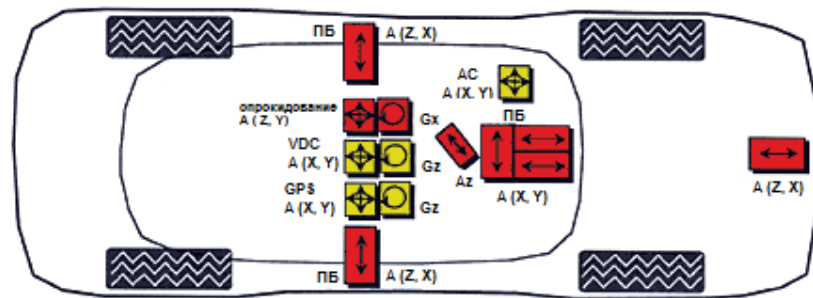


Рисунок 2.3 – Осі чутливості акселерометрів і гіроскопів в системах безпеки автомобілів

В конфігурації, що наведено на рисунку, інерційний вимірювальний вузол (ІВВ) розташований в центрі автомобіля. Додаткові інерційні системи (наприклад, протиугінні системи, системи динамічного контролю транспортного засобу, електронні системи паркувального гальма і навігаційні системи) використовують ІВВ сигнали, так само ІВВ може передавати інформацію в блок управління подушками безпеки. Окремі автономні акселерометри, як і раніше, розташовані по периметру автомобіля для розпізнання дорожньо-транспортної пригоди.

Кількість МЕМС-сенсорів в автомобілях продовжує значно зростати. У міру зростання, розробники знаходять нові можливості їх застосування і використання з метою підвищення безпеки та надійності автомобілів. Сьогодні, виробники в основному використовують інерційні сенсори МЕМС для реалізації обладнання систем безпеки (наприклад, контроль подушки безпеки). Ультразвукові сенсорні пристрої знайшли застосування в системі датчика аварії. Датчик закріплюється на колесах автомобіля або бампері для моніторингу шумових вібрацій. Якщо трапляється аварія, то датчик реєструє звукову хвилю, яка створюється варіаціями в деформації сталевих компонентів коліс, і задіє пасивні компоненти безпеки (подушки і ремені).

Ключовим методом детектування аварій є інерційний метод, заснований на виявленні змін в прискоренні за допомогою акселерометрів від компаній Bosch, ADI. В сучасні автомобілі впроваджено системи виявлення перекидання автомобіля. Системи визначають кут крену і швидкість крену транспортного засобу, щоб визначити, чи є це перекиданням автомобіля. Якщо так, то спрацьовує система, яка запускає бічні подушки безпеки для захисту водія і пасажирів

Багато систем виявлення перекидання використовують акселерометр для вимірювання поперечного прискорення. Якщо автомобіль буде вільно ковзати боком, то ймовірність перекидання дуже мала. Але якщо він потрапляє на бордюр або інший об'єкт, шанс на перекидання значно зростає. Акселерометр виявлення бічного зіткнення зазвичай не може виконати це завдання, тому що величина прискорення, при бічному ковзанні близька до типового рівню вібрацій.

В системах виявлення перекидання автомобіля використовують МЕМС-акселерометр (рис. 2.4) для вимірювання поперечного прискорення (ось Y). Якщо автомобіль потрапляє на бордюр або інший об'єкт, шанс на перекидання значно зростає.



Рисунок 2.4 – Застосування акселерометра при перекиданні автомобіля

Компанія Panasonic є постачальником гіроскопів для навігаційних систем GPS і стабілізації камер, а також систем ESC Continental і TRW.

Системи виявлення перекидання автомобіля використовують гіроскоп для розрахунку швидкості крену. Гіроскопи, які використовуються для виявлення перекидання, повинні мати відмінне подавлення зовнішніх ударів і вібрації, так як для автомобіля вельми звичайна справа зіткнутися з іншим транспортним засобом або нерухомим об'єктом. Але в деяких випадках, після такого зіткнення автомобіль чекає переверот, в цей момент і повинна спрацювати система виявлення перекидання автомобіля. Компанія Inproх працює і над створенням датчиків кутового положення.

Датчики швидкості на основі індуктивного і ємнісного методів детектування, LFID і LFCD відповідно, дозволяють детектувати від нульової швидкості до швидкості понад 50 000 об/хв, функціонують при високих температурах і в широкому частотному діапазоні. Індуктивні LFID-датчики працюють при температурі до 450° C, допускаючи частотний діапазон вище 1 МГц.

3 ФІЗИЧНА ТА ЕЛЕКТРИЧНА МОДЕЛІ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

3.1 Механічні сенсори сили

Сенсори сили складають значну групу сенсорів (рис. 3.1), що базуються на багатьох принципах. Основними типами механічних сенсорів сили є тензосенсори, сенсори тиску, акселерометри, гіроскопи. Для вимірювання сили використовують різні способи.

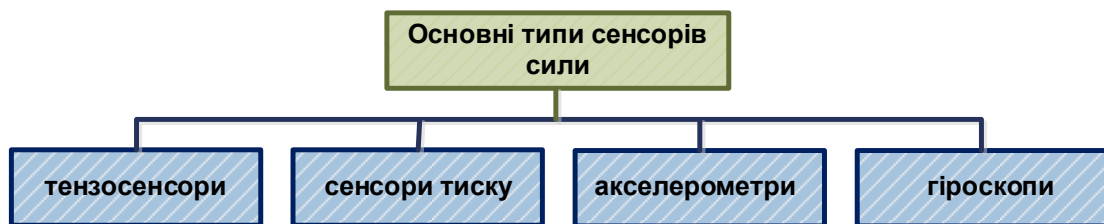


Рисунок 3.1 – Сенсори сили

Акселерометрами називаються сенсори, призначені для вимірювання лінійних і кутових прискорень. Акселерометри призначаються для вимірювання прискорень рухомих об'єктів і для перетворення цих прискорень в сигнал, який використовується для визначення параметрів траєкторії руху об'єкта або для цілей автоматичного управління траєкторією. Акселерометри вимірюють прискорення маси в проекціях на певні напрямки. Детектор переміщень, який вимірює мікроскопічні амплітуди вібраційних коливань або лінійних прискорень, є частиною всіх акселерометрів.

Мікромеханічні гіроскопи – мікромеханічні сенсори кутових швидкостей, є компонентами МЕМС, що відрізняються від інших складністю їх функціонування. Сучасні гіроскопи засновані на вимірі вібраційних та хвильових властивостей резонаторів різних типів, механічних, оптичних та інших типів. Принципи їх дії ґрунтуються на ефектах інерції, поляризації

пружних хвиль, зміщення та ін. Всі сенсори кутових швидкостей за своїм принципом роботи є вібраційними.

3.2 MEMS-акселерометри

Акселерометри – це електромеханічні пристрої, які сприймають або статичні, або динамічні сили прискорення. Акселерометр вимірює прискорення або силу, що викликає прискорення інерційної маси. Акселерометри мають у своєму складі механічну та електричну складові.

За принципом роботи мікромеханічні сенсори лінійних прискорень, або мікромеханічні акселерометри можуть бути розділені на два типи:

- мікромеханічні осьові акселерометри;
- мікромеханічні маятникові акселерометри.

За характером руху інерційної маси існують акселерометри з поступальним і кутовим переміщенням маси. Акселерометри лінійних прискорень з кутовим переміщенням маси називаються маятниковими. З'єднання ланок, що входять в структуру акселерометра, можуть утворювати або розімкнену, або замкнену структуру.

За кількістю вимірюваних одним акселерометром складових прискорення акселерометри діляться на:

- однокомпонентні (одноосні);
- двоконпонентні (двоосні);
- трикомпонентні (трьохосні).

Однокомпонентні акселерометри мають одну вісь чутливості. Такі акселерометри вимірюють одну складову лінійного прискорення. Двокомпонентні і трикомпонентні відповідно мають дві і три осі чутливості. Такі датчики відповідно вимірюють дві і три складові лінійного прискорення.

Принципи роботи датчиків розрізняються залежно від способу отримання електричного сигналу при детектуванні руху інерційної маси.

Існує кілька видів чутливих елементів, що найбільше використовуються в акселерометрах: п'єзоелектричний, п'єзорезистивний та ємнісний.

Існують п'єзоелектричні акселерометри, що базуються на п'єзоелектричному ефекті п'єзоматеріалів. П'єзоелектричний ефект полягає у виникненні поляризації діелектрика під дією механічної напруги (прямий п'єзоелектричний ефект). Зворотний п'єзоелектричний ефект - виникнення механічних деформацій під дією електричного поля.

При прямому п'єзо ефекті деформація п'єзоелектричного елемента призводить до виникнення електричної напруги між поверхнями деформованого твердого тіла, при зворотному п'єзо ефекті прикладена напруга до тіла викликає його деформацію.

П'єзоелектричний матеріал генерує на своїх поверхнях, до яких прикріплені електроди, електричний заряд, пропорційний силі, яка впливає. Коли зовнішня сила діє на п'єзоелектричну плівку, на її поверхні виникає електричний заряд, який є пропорційним силі, що діє (рис. 3.2).

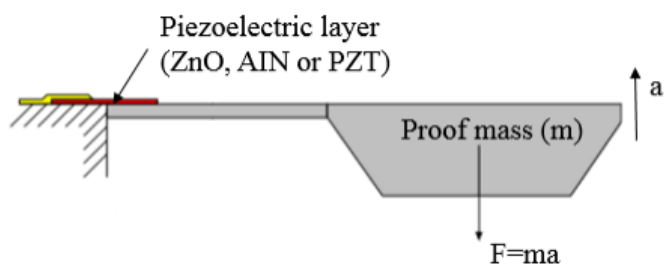


Рисунок 3.2 – П'єзоелектричний акселерометр

П'єзоелектричні акселерометри є активними датчиками, які генерують пропорційний механічним коливанням, електричний сигнал. При їх експлуатації не потрібно джерело живлення.

На електродах, розташованих на п'єзоелектричному диску товщиною t , при створенні на ньому механічного тиску T виникає електрична напруга U :

$$U = g tT, \quad (3.1)$$

де g - п'єзоелектричний коефіцієнт напруги.

Відсутність рухомих елементів конструкції виключає можливість зносу і гарантує виняткову довговічність п'єзоелектричних акселерометрів. Відзначимо, що віддають акселерометром сигнал, пропорційний прискоренню, можна інтегрувати з метою вимірювання та аналізу швидкості і зміщення механічних коливань.

П'єзоелектричні чутливі елементи знайшли широке застосування в сенсорах (датчиках) тиску і сили, в акселерометрах і спідометрах, в гідрофонах і мікрофонах.

У п'єзорезистивних акселерометрах чутливим елементом є тензодатчик, який вимірює деформацію п'єзорезистивних елементів, що підтримують інерційну масу в процесі вимірювання їх опорів. При цьому опори залежать від ступеня деформації (рис. 3.3, 3.4).

Дана деформація пропорційна величині і швидкості переміщення маси, а значить і прискоренню. Ці пристрої здатні вимірювати прискорення в широкому частотному діапазоні. Межі застосування даних приладів обумовлені перевантаженнями, які можуть бути критичними.

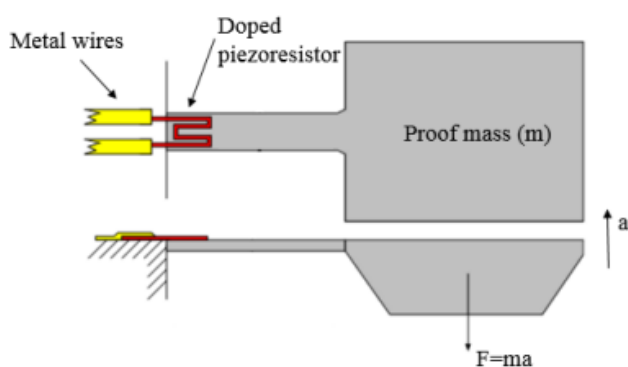


Рисунок 3.3 – Ілюстрація п'єзорезистивного акселерометра

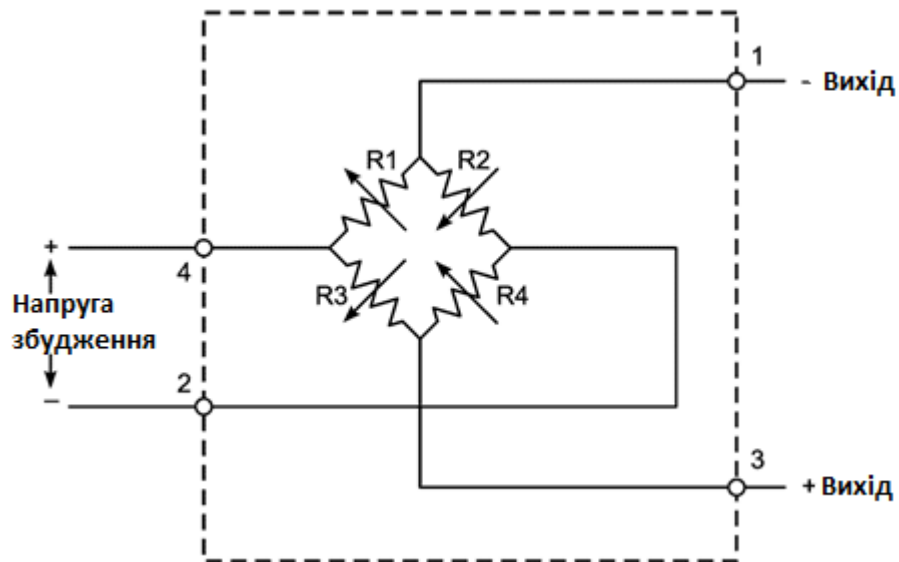


Рисунок 3.4 – П'єзорезистивний сенсор

При механічному впливі опір резисторів внаслідок п'єзорезисторного ефекту змінюється на величину ΔR , що приводить до міні вихідної напруги сенсора:

$$\Delta R/R = k * \epsilon, \quad (3.2)$$

де R – вихідний опір тензорезистора, ΔR - зміна опору при деформації решітки тензорезистору, k – коефіцієнт тензочутливості, ϵ - деформація.

Як правило, п'єзорезистивні елементи з'єднуються за схемою моста Уитстона (вимірювальний міст), в якому резистори $R1$ та $R4$ реєструють збільшення тиску, а $R2$ і $R3$ - зменшення тиску. Підсилювачі, сформовані на спільному з датчиком кристалі кремнію, нормалізують вихідний сигнал.

На рис. 3.5 і 3.6 наведено ємнісний акселерометр та ємнісний інерційний сенсор, який знаходить застосування у МЕМС-акселерометрах. В сенсорі три пластини, які утворюють послідовне з'єднання двох конденсаторів. При цьому дві крайні пластини жорстко закріплені, а центральна може зміщуватися під дією інерційних сил. Зміна відстані між пластинами призводить до зміни ємності обох конденсаторів.

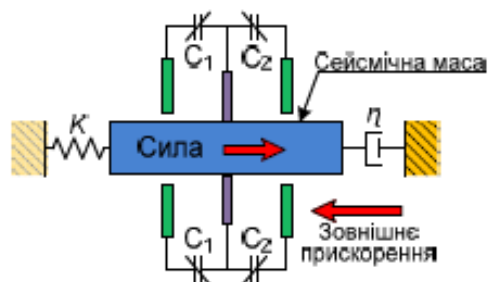


Рисунок 3.5 – Ємнісний інерційний сенсор

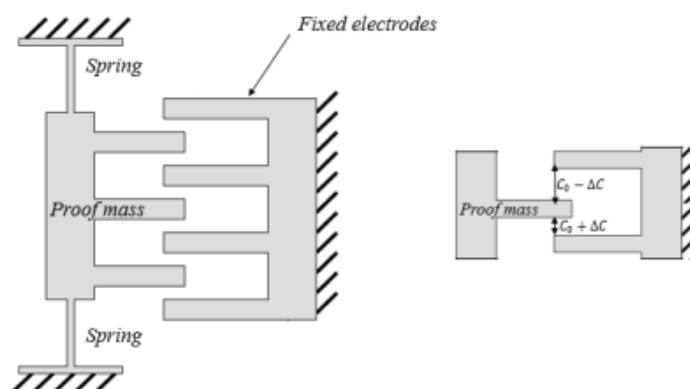


Рисунок 3.6 – Ємнісний МЕМС-акселерометр

Ємнісний сенсорний елемент МЕМС-акселерометра фіксує зміни в електричній ємності в залежності від прискорення. Акселерометр відчуває зміну ємності між статичним і динамічним станами.

Ємнісні акселерометри дозволяють детектувати як високі, так і малі діапазони прискорення з високою роздільною здатністю, характеризуються температурною стабільністю, малим енергоспоживанням, а також безперервно підвищуваним рівнем їх точності, шумових властивостей, підвищення ступеня інтеграції схем обробки сигналу, включаючи додавання нових функцій і інтерфейсних можливостей. Таким чином, дані пристрої можна використовувати в автомобільних системах на їх основі.

За принципом вимірювання лінійного прискорення мікромеханічні акселерометри ділять на:

- мікромеханічні акселерометри прямого перетворення;
- мікромеханічні акселерометри компенсаційного перетворення.

Чутливі елементи мікромеханічні акселерометри прямого перетворення безпосередньо передають інформацію на акселерометр прискорення у вигляді переміщень виконавчого механізму або деформацій пружних елементів підвісу на вторинний перетворювач (переміщень або деформацій). В цьому випадку всі похибки вимірювального ланцюга присутні у вихідному сигналі акселерометра.

В акселерометрах компенсаційного перетворення сила, яка викликана вимірюваним прискоренням, частково або повністю врівноважується за допомогою ланцюга негативного зворотного зв'язку, що реалізує силову компенсацію чутливого елемента за допомогою вихідного сигналу, що надходить на пристрій компенсації (перетворювачі сили, моменту). В цьому випадку точність вимірювального ланцюга залежить, в основному, від перетворювача сили (моменту).

Статичні сили включають в себе гравітацію, а динамічні сили можуть включати вібрацію і рух. Вихідний сигнал сенсора можна легко піддати одноразовому або дворазовому інтегруванню, тим самим отримати зміщення або швидкість.

У акселерометра виділяють вісь чутливості і перпендикулярні до неї поперечні вісі. Вісь чутливості – це вісь, в напрямку якої можливе переміщення інерційної маси, обумовлене конструкцією підвісу. Акселерометри, з однією віссю чутливості називають однокомпонентними або одноосними. В одному корпусі можуть бути встановлені інерційні маси з різним напрямком осей чутливості (дво- і трьоосний акселерометри). Акселерометри можуть вимірювати прискорення по одній, двом або трьом осям.

3.3 Механічна модель акселерометра лінійних прискорень

Основне призначення сенсора прискорень певної конструкції полягає у виявленні переміщення інерційної маси дотично до корпусу пристрою і перетворенні його в електричний сигнал, що є еквівалентним. Частиною всіх акселерометрів є детектор переміщень, який вимірює мікроскопічні амплітуди вібраційних коливань або лінійних прискорень, є частиною всіх акселерометрів.

Основними характеристиками акселерометрів є чутливість, діапазон вимірювань, смуга пропускання частот, масштабний коефіцієнт, точність, швидкодія і ін.

Акселерометри чутливі не тільки до механічних коливань в напрямку їх головної поздовжньої вісі, але в деякій мірі і до коливань в перпендикулярній до цієї вісі площині. Поперечна чутливість характеризує здатність датчика перетворювати в електричний сигнал прискорення, спрямоване під кутом 90° до осі чутливості датчика. Значення поперечної чутливості виражається у відсотках від значення чутливості в напрямку головної осі. У ідеального акселерометра поперечна чутливість дорівнює нулю.

Пристрій і принцип дії датчика лінійних прискорень розглянемо на прикладі однокомпонентного акселерометра з пружинним підвісом чутливого елемента (інерційної маси). Оскільки акселерометр вимірює прискорення, або силу, що викликає прискорення інерційної маси то фізична модель його являє собою масу, підвішену на пружині і закріплену в нерухомому корпусі – просту систему з однією ступінню свободи вздовж вимірювальної осі.

Структурна схема акселерометра приведена на рис. 3.7. Всі акселерометри складаються зі спеціального інерційного елемента масою m , пружної підтримуючої системи (пружина) і демпфуючого пристрою.

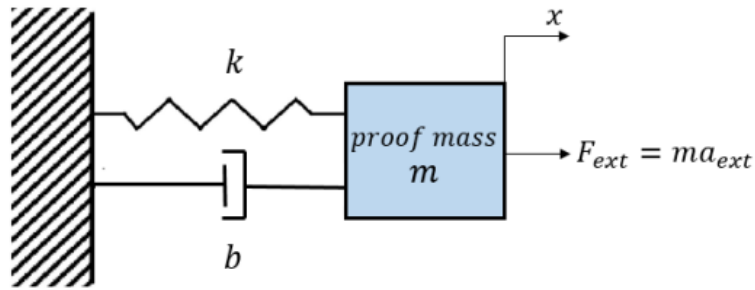


Рисунок 3.7 – Механічна модель акселерометра лінійних прискорень

Як видно з рисунку, сенсорний елемент (інерційна маса) m підвішений до корпусу приладу за допомогою пружини k . Для демпфірування власних коливань чутливого елемента використовується демпфер b . Вихідний сигнал, пропорційний виміряному прискоренню, знімається з потенціометричного перетворювача.

Акселерометр має вісь чутливості ox . На рухомому об'єкті вісь чутливості встановлюється паралельно тій вісі, відносно якої необхідно вимірювати прискорення. Принцип дії акселерометра заснований практично на вимірі сили інерції, що розвивається інерційною масою m при її русі з прискоренням. Переміщення чутливого елемента по відношенню до вихідного позначається через x .

Припустимо, що рухається з постійним прискоренням $a = \dot{V}$. Проекція цього прискорення на вісь X позначається \dot{V}_x . При русі з прискоренням \dot{V}_x до інерційної маси будуть прикладені певні сили: сила інерції F_u , сила деформації пружини F_y , сила тяжіння уздовж вісі чутливості G_x .

Сила інерції F_u , що дорівнює добутку маси чутливого елемента на прискорення \dot{V}_x визначається за формулою:

$$F_u = m\dot{V}_x, \quad (3.3)$$

Сила деформації пружини F_y визначається за формулою:

$$F_y = k_y x, \quad (3.4)$$

де k_y - коефіцієнт пружності;

Сила тяжіння G_x уздовж вісі чутливості визначається за формулою:

$$G_x = mg_x. \quad (3.5)$$

Врахуємо напрямки сил і знайдемо суму в проекціях на вісь чутливості:

$$-m\dot{V}_x - k_y x + mg_x = 0. \quad (3.6)$$

З (3.6) випливає, що переміщення x чутливого елемента дорівнює:

$$x = -\frac{m}{k_y} (\dot{V}_x - g_x) \quad (3.7)$$

У виразі (3.7) величина $(\dot{V}_x - g_x)$ - позірне прискорення.

Позірне прискорення позначено, як \dot{V}_{kx} . Величина, що визначає відношення маси чутливого елемента до коефіцієнта пружності підвісу, є чутливість датчика h .

Тоді вираз (3.7) запишеться, як:

$$x = -h\dot{V}_{kx}, \quad (3.8)$$

де $h = \frac{m}{k_y}$ - чутливість елемента.

Знак мінус в (3.8) показує, що інерційна маса зміщується в протилежну сторону напрямку прискорення. Оскільки знак мінус не впливає на характеристики датчика, то його зазвичай опускають.

Складемо рівняння динаміки акселерометра.

Рівняння динаміки відображає поведінку чутливого елемента в перехідних режимах. У цьому режимі на сенсорний елемент додатково діють інерційна сила:

$$F_i = m\ddot{x} , \quad (3.9)$$

та сила демпфування:

$$F_d = k_d \dot{x} , \quad (3.10)$$

де k_d - коефіцієнт демпфування.

З огляду на сили, зазначені в виразах (3.6), (3.9) і (3.10), рівняння динаміки акселерометра може бути представлено у вигляді диференціального рівняння другого порядку, тобто рівняння руху інерційної маси:

$$m\ddot{x} + k_d \dot{x} + k_y x = -m(\dot{V}_x - g_x) , \quad (3.11)$$

або у більш зручній формі:

$$m\ddot{x} + k_d \dot{x} + k_y x = m\dot{V}_{kx} . \quad (3.12)$$

Рівняння (3.12) є основним рівнянням динаміки акселерометра лінійних прискорень з поступальним переміщенням чутливого елемента. При наявності сил сухого тертя в праву частину рівняння необхідно додати F_{mp} , тоді:

$$m\ddot{x} + k_d \dot{x} + k_y x = m\dot{V}_{kx} - F_{mp}. \quad (3.13)$$

При дослідженні систем управління елементи, що входять до її структури, можуть бути представлені у вигляді передавальних функцій. Застосуємо для отриманого диференційного рівняння (3.12) перетворення Лапласа при нульових початкових умовах:

$$m p^2 X(s) + k_d p X(s) + k_y X(s) = m V(s), \quad (3.14)$$

де $X(s)$ - зображення переміщення інерційної маси, $V(s)$ - зображення прискорення об'єкта.

Для спрощеної механічної системи вхідним сигналом є прискорення об'єкта, а вихідним сигналом - значення переміщення інерційної маси в системі координат ox .

Відповідно до визначення передавальної функції $W(s)$ отримаємо вираз:

$$W(s) = \frac{X(s)}{V_{kx}(s)} = \frac{m}{ms^2 + k_d s + k_y}. \quad (3.15)$$

Цей вираз є передавальною функцією по каналу «прискорення – переміщення інерційної маси».

При дослідженні динаміки сенсора зазвичай використовують рівняння у вигляді:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = \dot{V}_{kx} - \frac{F_{mp}}{m}, \quad (3.16)$$

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

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

Рівняння (3.14) розглянемо в статичному режимі, тобто коли $\ddot{x} = \dot{x} = 0$.

Крім того, приймемо, що $F_{mp} = 0$.

В результаті маємо:

$$\omega_0^2 x = \dot{V}_{kx}, \quad (3.17)$$

отже чутливість елемента:

$$h = \frac{1}{\omega_0^2}. \quad (3.18)$$

При такій формі запису чутливості (3.18) видно, що чим вище частота власних недемпфованих коливань, тим нижче чутливість датчика. Так як ω_0 в (8 ... 10) раз повинна бути вище частоти зміни прискорення автомобіля, то створення акселерометра лінійних прискорень, що змінюється з великою частотою, є досить важким завданням.

Наявність тертя в осях підвісу чутливого елемента призводить до появи порога чутливості. Для отримання виразу порога чутливості запишемо рівняння статички у вигляді:

$$\omega_0^2 x = \dot{V}_{kx} - \frac{F_{mp}}{m}. \quad (3.19)$$

При $x=0$, отримаємо:

$$\dot{V}_{kx\min} \geq \frac{F_{mp}}{m} . \quad (3.20)$$

Припустимо $F_{mp} = 0$ і застосуємо перетворення Лапласа до лівої та правої частин рівняння (3.16):

$$s^2 x(s) + 2\xi\omega_0 s x(s) + \omega_0^2 x(s) = \dot{V}_{kx}(s) , \quad (3.21)$$

отже, передавальної функції акселерометра визначається за формулою:

$$W(s) = \frac{X(s)}{\dot{V}_{kx}(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} . \quad (3.22).$$

Так як вихідна напруга сенсора пропорційна переміщенню інерційної маси, то, використовуючи вираз (3.22), може бути записана передавальна функція акселерометра по каналу «прискорення - вихідна напруга»:

$$W(s) = \frac{X(s)}{\dot{V}_{kx}(s)} = \frac{h}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1} . \quad (3.23)$$

Як видно з виразу (3.23), з точки зору динамічних властивостей акселерометр являє собою коливальну ланку. У виразі (3.21) постійна часу дорівнює:

$$T = \frac{1}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_y}} \quad (3.24)$$

визначає період власних коливань, що не затухають. Прискорення \dot{V}_{kx} - вхідна величина, а x - вихідна величина.

3.4 Електрична модель акселерометра ємнісного типу

Одним з трьох найбільш використовуваних методів виявлення прискорення є ємнісне вимірювання, включаючи п'єзорезистивне та п'єзоелектричне вимірювання. У високопродуктивних акселерометрах часто використовується ємнісний метод виявлення, так як вартість їх виготовлення нижча і вони споживають менше енергії, при цьому їх можна використовувати в програмах з високою чутливістю.

Принцип ємнісного вимірювання полягає у вимірюванні пробного переміщення маси, коли до перетворювача прикладається зовнішнє прискорення. Коли пробна маса відхиляється вздовж напрямку чутливості, значення ємності між пробною масою та нерухомими електродами змінюється. Потім зміна ємності вимірюється за допомогою схеми аналогового переднього кінця, яка може бути більш або менш складною залежно від специфікацій і застосувань.

Для сенсора механічна структура будується на поверхні пластини шляхом нанесення тонких плівок і вибіркового видалення їх частин. Найпоширенішим шаром, який використовується в мікрообробці поверхні, є полікремній.

Конструкція ємнісного МЕМС-акселерометра представляє собою зустрічно-стрижневу конструкцію [8] з балками, приєднаними до маси, які являють собою обкладинки конденсаторів. Акселерометр розміщений на монокристалічній кремнієвій підкладці, до якої він прикріплюється чотирма анкерними болтами.

На рис.3.9 схематично зображено конструкцію акселерометра. Необхідно зауважити, що кожна фіксована обкладка формує з рухомими пластинами конденсатора схему датчика прискорення. Обкладка

конденсатора складається з двох окремих підобкладок, в яких є активні поверхні на сторонах, що протилежні до центра конденсатора.

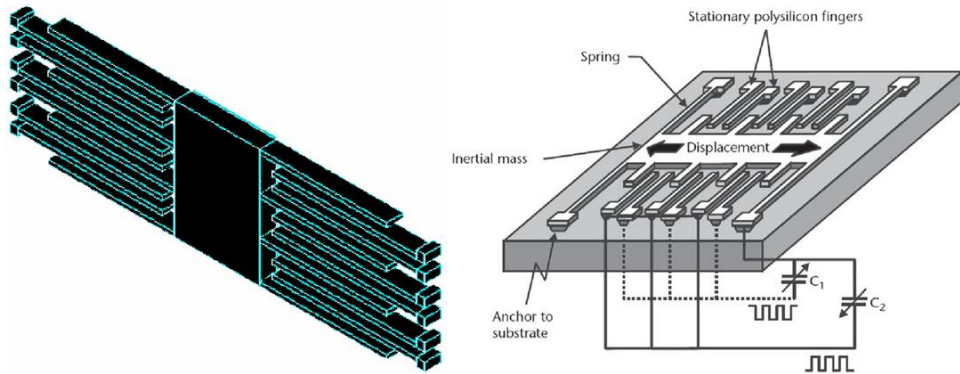


Рисунок 3.9 – Конструкція ємнісного МЕМС-акселерометра зустрічно-стрижневої конструкції

Розглянемо математичну модель акселерометра, тип ємнісний. Для опису математичної моделі побудуємо спрощену електричну модель акселерометра (рис. 3.10). Для того, щоб виміряти ємність, на електроди конденсаторів C_{s1} та C_{s2} подається напруга V_0 . Напруга V_0 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.

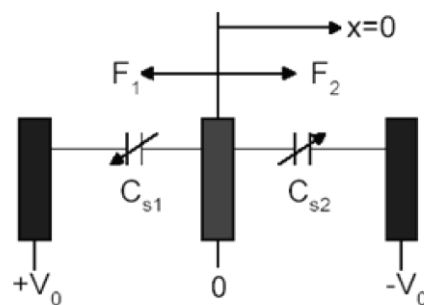


Рисунок 3.10 – Електрична модель МЕМС-акселерометра

Елемент інерційної маси є досить великим. Враховуючи це, можна знехтувати деформацією елемента і припустити, що електроди паралельно рухаються. Необхідно визначити електричну ємність.

Ємність конденсатору визначається за формулою:

$$C = \varepsilon \frac{S}{x}, \quad (3.25)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу;

S - площа пластини;

x - відстань між обкладинками конденсатора.

Заряд конденсатору дорівнює:

$$q = CV, \quad (3.26)$$

де C – ємність конденсатору,

V – напруга, що подана на електроди.

Враховуючи (3.26), приріст заряду рухомої обкладинки при її зміщенні на певну відстань x становить:

$$dq = q_1 - q_2 = 2\varepsilon SV \frac{dx}{x^2 - dx^2}. \quad (3.27)$$

З виразу (3.27) видно, що залежність приросту заряду від певної зміни відстані між обкладинками є нелінійною. Тоді приріст напруги на обкладинці конденсатора, що рухається, буде лінійно залежати від певної зміни відстані між обкладинками:

$$dV = \frac{q}{\varepsilon S} dx. \quad (3.28)$$

Акселерометр використовує певний ємнісний сенсор диференційного типу. В сенсорі нерухомі пластини живляться рівними, але протифазними напругами. Напруга має значення V_0 і частоту 1 МГц. В результаті комплексне діюче значення напруги, що виникає на середній пластині конденсатора, по методу двох вузлів, визначається формулою:

$$V = \frac{V_1 j\omega C_1 + V_2 j\omega C_2}{j\omega C_1 + j\omega C_2}, \quad (3.29)$$

де ω - кругова частота.

Напруга лінійно залежить від переміщення. З урахуванням того, що $V_1 = -V_2$, а ємність $C = \varepsilon \frac{S}{x - dx}$, з (3.29) отримаємо:

$$V = V_1 \frac{dx}{x}. \quad (3.30)$$

З (3.30) видно, що залежність напруги на рухомих обкладинках від переміщення є лінійною.

Електрична ємність визначається за допомогою формул:

$$C_1 = \varepsilon \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{\delta + x} \quad \text{та} \quad C_2 = \varepsilon \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{\delta - x}, \quad (3.31)$$

де C_1 та C_2 - ємність між верхнім та нерухомим електродами, відповідно.

4 МОДЕЛЮВАННЯ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

4.1 Етапи проектування МЕМС

Проектування являє собою процес складання опису, необхідного для створення в заданих умовах ще неіснуючого об'єкта, на основі первинного опису даного об'єкта і/або алгоритму його функціонування, що включає в себе комплекс робіт з пошуку, дослідження, розрахунків, моделювання та конструювання. Проектування - це складний специфічний вид творчої діяльності людини, заснований на глибоких наукових знаннях і творчому пошуку, використанні накопиченого досвіду і навичок у певній сфері.

Автоматизація проектування МЕМС передбачає систематичне використання засобів обчислювальної техніки при раціональному розподілі функцій між проектувальником та ЕОМ і обґрунтованому виборі методів машинного рішення задач.

На початковому етапі проектування МЕМС відбувається опис мікросистеми. Вона включає електричні і механічні параметри системи. На наступному кроці виконують проектування електричної схеми вбудованої системи та подальший аналіз за допомогою відповідних програмних засобів [4]. За певними результатами побудови першого наближення електричної схеми мікросистеми відбувається проектування конструкції механічної складової і подальше моделювання її вихідних характеристик. Аналіз дає можливість уточнити електричну схему системи заміщення та інтегрувати її у загальну схему МЕМС виробу. При проектуванні відбувається ітераційний процес продовжується до ти пір, коли всі вихідні електричні та механічні параметри будуть задовольняти технічному завданню. Після проектування системи передбачено виготовлення та тестування мікросистеми.

МЕМС являють собою наукоємні пристрої та їх ефективне проектування потребує використання нових інформаційних технологій, програмних засобів, методів, моделей, методологій і алгоритмів.

Всі реальні системи мають певні характеристики, а саме, структуру, функцію.

Математичні моделі є основою систем автоматизації проектування, як множина математичних об'єктів, а також відношень між ними. Математичні моделі адекватно відображають певні властивості МЕМС [4]. Багатомасштабним моделюванням є такий підхід при якому в проектуванні використовують різні рівні абстрагування. Розрізняють наступні етапи проектування- низхідний, висхідний і змішаний. Етапи залежать від послідовності процедур. Висхідне проектування передбачає послідовність вирішення завдань від нижніх рівнів до верхніх. Низхідне проектування виконується в зворотному напрямі.

Проектування МЕМС потребує інтегровані системи, які включають проектування на компонентному, міждисциплінарному рівнях, проектування електронних компонент, а також проектування, що враховує забезпечення надійності функціонування системи.

При розв'язанні задач проектування МЕМС використовується блочно-ієрархічний підхід. Такий підхід передбачає використання певного принципу ієрархічності для структурування представлень про об'єкти за ступенем деталізації описів та принцип декомпозиції, яка передбачає блочність, модульність для розбиття кожного рівня на блоки, і мати можливість їх поблочне проектування [4].

Система – об'єктивна єдність, зв'язаних між собою об'єктів та явищ. При якісному оцінюванні складності систем розрізняють вбудовані системи, підсистеми, комплекси, пристрої. При цьому при проведенні класифікації чіткої межі не існує. Залежно від функціонального призначення в одному випадку комплекс може бути системою, а в іншому випадку може бути пристроєм. При цьому система є поняттям відносним та може

використовуватися при проектуванні. Для прийняття ефективного рішення потрібно враховувати взаємодію багатьох певних факторів і обмежень.



Рисунок 4.1 – Структурна схема проектування та виготовлення вбудованих систем

Вхідними даними для автоматизованого проектування та виготовлення MEMC акселерометрів є технічне завдання (ТЗ), яке містить зазначені функціонально-конструктивні параметри, якими має володіти виріб, а також розроблена 3D-модель. Формування вектора вихідних даних відбувається на основі запропонованої концептуальної моделі MEMC акселерометра [5].

Після того, як дані отримано відбувається вибір типу MEMC-акселерометра, за яким здійснюється пошук MEMC акселерометра-аналога. Якщо потрібен результат пошуку, то переходимо до методу вибору типового акселерометра, інакше відбувається пошук по елементах конструкції MEMC-акселерометрів. При успішному пошуку елементів конструкції здійснюється пошук операцій їх виготовлення і формування MEMC-акселерометра як єдиної структури. На більш низькому рівні здійснюється пошук

елементарних елементів і пошук операцій їх виготовлення. Потім відбувається формування елементів конструкції і цілісної структури.

На подальшому етапі здійснюється структурно-параметричний синтез проекту виготовлення MEMC-акселерометрів. При цьому за допомогою моделі здійснюється вибір обладнання за вартісними і тимчасовим критеріям і здійснюється перевірка адекватності отриманої моделі шляхом імітаційного моделювання. Коли перевірка адекватності успішно пройшла, то відбувається формування технічної документації, якщо інакше, тоді необхідно повернутися до зміни структури ТП до тих пір, поки структура не буде задовольняти заданим параметрам [5].

Так як MEMC є складною системою, то верхній рівень проектування може бути розбитий на блоки нижчого рівня проектування, а саме, другий рівень. Блоки другого рівня також є складними об'єктами і їх можна розглядати як системи відносно до блоків третього рівня та доцільно з технічного погляду, розбити на простіші блоки, то кожний блок другого рівня може бути описаний як об'єднання блоків третього рівня. Блоки найнижчого рівня називають базовими елементами. Поділ на блоки виконується за функціональною ознакою. У випадку побудови елементів MEMC для розроблення використовують три рівні.

При розробці MEMC використовують багаторівневе проектування “згори донизу”, “знизу догори”, наскрізне, а також паралельне їх поєднання [4,5].

На системному рівні проектування розробляється ТЗ, призначене для проектування вбудованої системи на основі аналізу певних додаткових функцій, які належить виконувати ВС. Другим рівнем проектування є функціональний рівень, третім рівнем є схемотехнічним, а четвертий рівень являє собою компонентний рівень.

З цією метою розроблені певні спеціалізовані системи моделювання і проектування MEMC – CoventorWare, MEMS Pro. При моделюванні на мікрорівні використовуються універсальні програми ANSYS, COMSOL

Multiphysics. Дані програми дозволяють розв'язувати задачі механіки конструкції, механіки рідини і газу, а також теплопередачі і теплообміну, електродинаміки і акустики, тощо. Програма SUGAR (University of California, Beerly) містить в собі бібліотеку MEMC, призначену для системи Matlab.

Програмні засоби, що використовуються при проектуванні MEMC дозволяють дослідити функціональні моделі, елементи неоднорідних MEMC на макрорівні. Завдяки комп'ютерному моделюванню визначають механічні та фізичні параметри компонентів пристрою та знаходять оптимальні конструктивні співвідношення. При цьому комп'ютерне моделювання та його автоматизація є одним з основних напрямів розвитку MEMC [4,5].

4.2 Matlab Simulink для моделювання об'єктів

При моделюванні об'єктів в Matlab/Simulink є можливість дослідження поведінки динамічних систем. Утворення чисельної моделі в досліджуваній системі здійснюється шляхом графічного складання певної схеми з'єднань елементарних візуальних блоків, що містяться в бібліотеках Simulink. Кожний блок представляє собою математичну програму. Лінії з'єднання блоків перетворюються на зв'язки між цими програмами. Вони дозволяють визначити послідовність виклику програм, а також пересилання інформації. В результаті такого складання утворюється програмна модель, яка має назву S-моделі і що зберігається у файлі, що має розширення .mdl. Такий процес утворення обчислювальних програм називають візуальним програмуванням [9].

При побудові S-моделі використовуються спеціальні модулі (блоки), що зберігаються в бібліотеці Simulink S-модель може мати ієрархічну структуру, тобто складатися з моделей більш низького рівня, причому кількість рівнів ієрархії є практично необмеженою. Протягом моделювання є можливість спостерігати за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні блоки "оглядові вікна", що входять до складу

бібліотеки Simulink. Склад бібліотеки Simulink може бути поповнений користувачем за рахунок розробки власних блоків.

Використання Simulink є особливо зручним при моделюванні систем, які складаються із з'єднаних певним чином окремих функціональних пристроїв, поведінка яких описується відомими залежностями. Тоді схема з'єднань візуальних блоків у вікні блок-схеми S-моделі збігається з реальними зв'язками між цими пристроями. Ця обставина суттєво спрощує програмний аналіз і синтез систем управління.

Розширення системи Matlab Simulink характеризується простотою і наочністю використання при моделюванні різних пристроїв і систем, в тому числі і електротехнічних (рисунок 4.4). У Simulink використовується візуально-орієнтований підхід, що передбачає, перенос готових блоків за допомогою миші з бібліотеки у вікно документа Simulink. При цьому компоненти з'єднують лініями входи і виходи цих блоків. В результаті може бути отримана S-модель, тобто Simulink модель, яка запускається за допомогою кнопки Run.

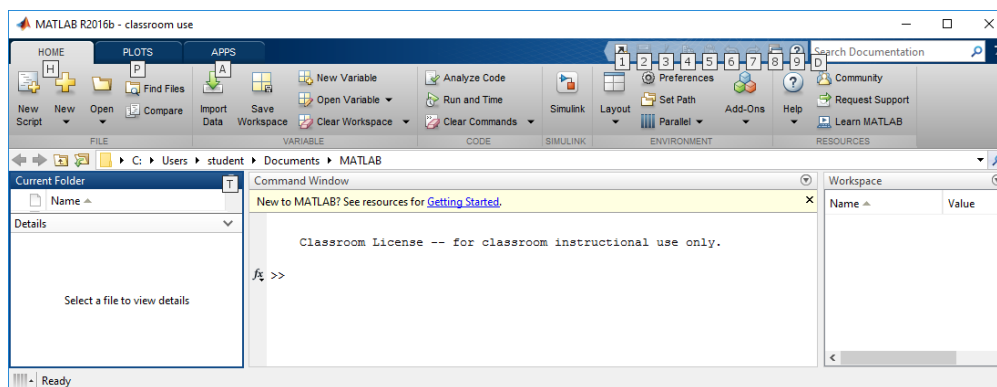


Рисунок 4.4 – Головне вікно системи Matlab Simulink

Бібліотека Simulink являє собою набір різних візуальних блоків. Для забезпечення доступу до них, а отже, необхідно натиснути кнопку Simulink Library на панелі інструментів Matlab. При цьому з'являється вікно навігатора - браузера бібліотеки, яке представлено на рис. 4.5.

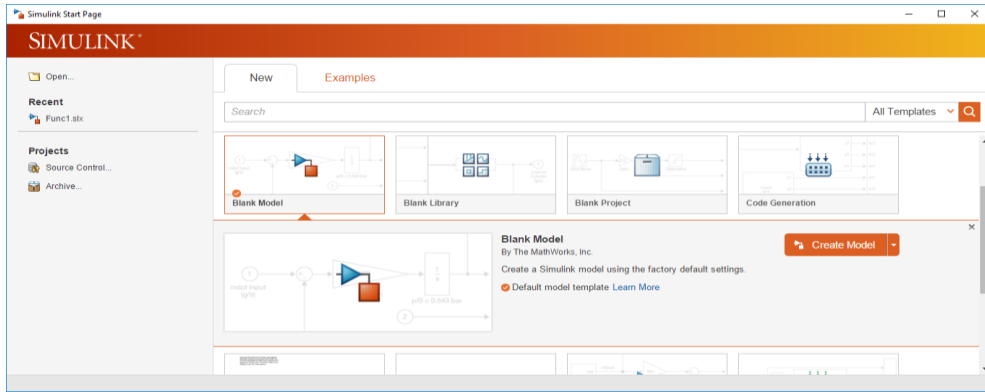


Рисунок 4.5 – Simulink Library Browser

Вікно містить наступні елементи (рис. 4.6):

- заголовок, що має назву вікна - Simulink Library Browser;
- панель інструментів, яка містить ярлики використуваних команд;
- вікно коментаря, призначеного для виведення повідомлення про певний обраний блок;
- список розділів бібліотеки, який реалізований у вигляді дерева;
- вікно вмісту розділу бібліотеки, я саме, список вкладених розділів бібліотеки або певних блоків.

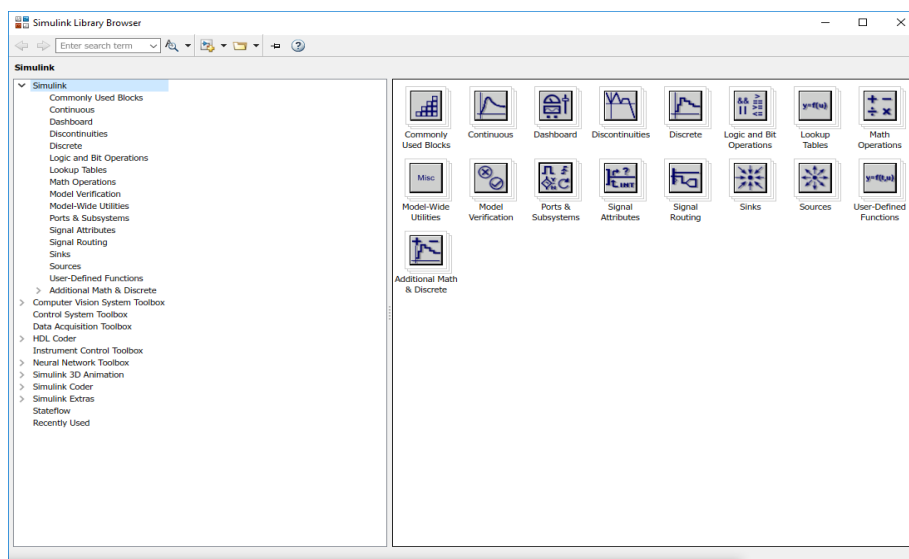


Рисунок 4.6 – Вікно браузера бібліотеки

4.3 Моделювання мас-пружинної демпферної системи

Фізична модель механічного компонента МЕМС-акселерометра описується диференціальним рівнянням другого порядку, наведеним у підрозділі 3.3.

Для моделювання мас-пружинної системи в Matlab Simulink наведемо вихідні дані з урахуванням основного рівняння динаміки МЕМС-акселерометра (3.12) [9].

Вхід системи представляє собою силу інерції $f(t)$, вихід системи – переміщення чутливого елемента $y(t)$, $\dot{y}(t)$ – швидкість руху системи:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t), \quad (4.1)$$

де c – коефіцієнт затухання, k – постійна пружини, при умові, що $\dot{y}(t) = 0$, $y(t) = 0$.

Для розглянутого прикладу використані наступні вхідні дані:

Маса (mas) $m = 2$ кг; початкова швидкість $\dot{y} = 0$ м/с, початкове переміщення, $y = 0$ м, коефіцієнт загасання $c = 2$, постійна пружини $k = 4$ і функція $f(t) = 1$.

Динамічна система, поведінка якої описується формулою (4.1), характеризується двома параметрами: переміщенням $y(t)$ і швидкістю $\dot{y}(t)$.

У пакеті Simulink для управління всім ходом обчислювального процесу розроблені графічні модулі, які використовуються для складання структурних схем досліджуваних систем.

Поведінка механічної системи описується за допомогою Simulink, модель системи показана на рис. 4.7.

Два стани динамічної системи формуються окремо за допомогою блоків score і блоку відображення.

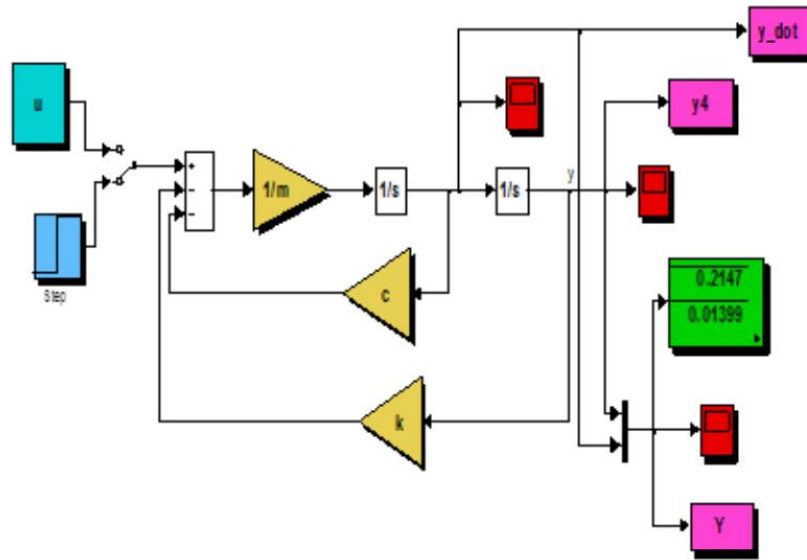


Рисунок 4.7 – Simulink модель мас-пружинної демпферної системи

Третій блок scope використовується для відображення обох станів на одному графіку. Блок відображення показує числові значення кожного стану в кожен момент часу під час симуляції, після закінчення симуляції відображаються тільки значення в останній момент часу.

Результат моделювання зміщення мас-пружинної демпферного системи показаний на рис. 4.8.

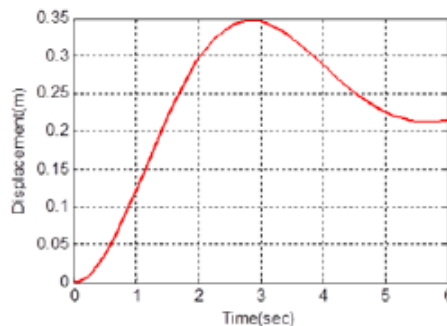


Рисунок 4.8 – Результат моделювання переміщення мас-пружинної демпферної системи

Модель, що описується виразом (4.1), може бути сформульована в термінах «стан-простір» (state-space).

Моделі простору станів - це моделі, які використовують змінні стану для опису системи за допомогою набору диференціальних або різницевих рівнянь першого порядку, а не одного або кількох диференціальних або різницевих рівнянь n-го порядку.

Змінні стану $x(t)$ можуть бути відновлені за вимірним даними входу-виходу, але самі вони не вимірюються під час експерименту.

Структура моделі простору станів є раціональним вибором для швидкої оцінки, тому що вона вимагає, щоб ви вказали тільки один вхід, порядок моделі, n . Порядок моделі являє собою ціле число, яке дорівнює виміру $x(t)$, і відноситься, але не обов'язково, до числа входів і виходів, які використовуються у відповідному лінійному різницевому рівнянні.

У середовищі Simulink можна виконати чисельне моделювання state-space системи. Це забезпечує основу для моделювання диференціальних рівнянь вищого порядку.

В просторі стану будь-яка багатовимірна динамічна система описується системою диференціальних рівнянь першого порядку в явній формі:

$$\dot{x} = f(x, u, t) , \quad (4.2)$$

де $x(t)$ - n -мірний вектор-стовпець, компонентами якого є змінні стану, $u(t)$ - r -мірний вектор-стовпець, координати якого містять значення вихідних змінних, t - незалежна змінна, час.

Рівняння (4.2) називають рівнянням стану. Вихідна змінна може бути представлена наступним чином:

$$y = g(x, u, t) . \quad (4.3)$$

Рівняння (4.3) називається рівнянням вихідної змінної.

Для багатовимірних лінійних систем рівняння (4.2), (4.3) відповідно приймають вигляд:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) , \quad (4.4)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) , \quad (4.5)$$

де $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$ - матриці розміру $(n \times n)$, $(n \times r)$, $(k \times n)$, $(k \times k)$ відповідно.

Якщо матриці A , B , C , D не залежать від часу, то така система називається багатовимірною стаціонарною системою.

Для опису динаміки системи в просторі станів необхідно також задати вектор початкових умов:

$$x(t_0) = x_0 . \quad (4.6)$$

Мас-пружинна демпферна система є коливальною системою, що має одну ступінь свободи. Для коливальної системи state-space модель має вигляд стандартної форми рівнянь стану у векторно-матричних позначеннях та має вигляд:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (4.7)$$

$$y = Cx + Du , \quad (4.8)$$

де A , B , C , D – коефіцієнти. Значення матриць A , B , C , D для коливальної

системи: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix}$, $u = f(t)$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$.

Якщо виходом даної системи є зміщення коливальної системи від положення рівноваги, тоді $C = [1 \ 0]$ та $D = 0$. Якщо виходом даної системи є її швидкість, тоді $C = [0 \ 1]$.

Для чисельного моделювання в Simulink state-space блоку використовуються бібліотечні модулі Simulink, які дозволяють здійснити безпосереднє введення матриць A, B, C і D, які є унікальними для конкретної моделі. Сучасна теорія управління дозволяє сформувавши математичну модель простору станів, що забезпечує ефективну симуляцію state-space.

Simulink дозволяє моделювати динамічні системи в передавальних функціях [6]. Для мас-пружинної демпферної системи еквівалентна модель на основі передавальної функції описується виразом (3.15), тобто:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (4.9)$$

У середовищі Simulink є стандартний блок, який дозволяє безпосередньо вводити чисельник і знаменник виразу, що описує динамічну систему.

Simulink state-space модель на основі передавальної функції, що описує мас-пружинну демпферну систему, показані на рис. 4.9 [10].

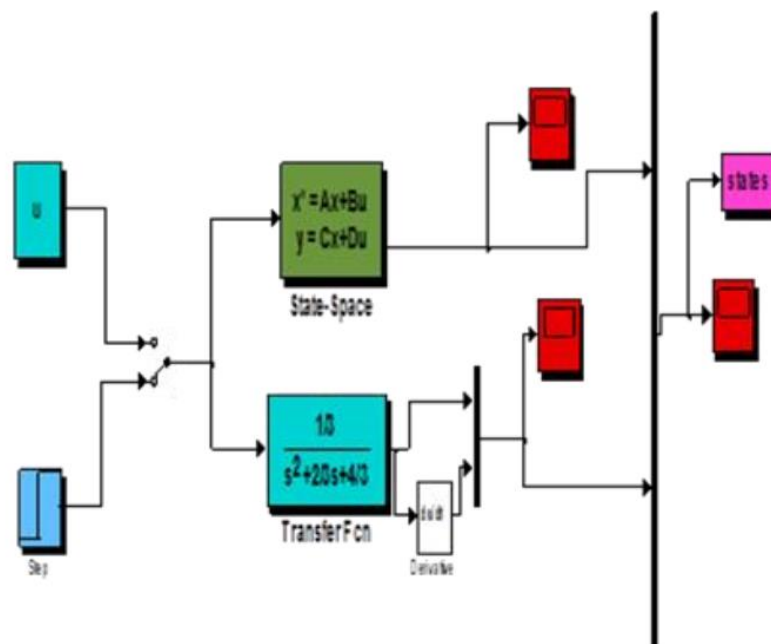


Рисунок 4.9 – Simulink state-space модель на основі передавальної функції

4.4 Моделювання рівнянь другого порядку з одним ступенем свободи (Single Degree of Freedom System-SDOF)

Розглянемо просту пружну систему з масою. Маса (m), що піддається впливу сили $F(t)$ в напрямку $x(t)$ як функції часу (рисунок 4.10). Маса може переміщатися тільки в напрямку x , отже, є системою з одним ступенем свободи (SDOF). Пружинний механізм із жорсткістю k чинить опір руху.

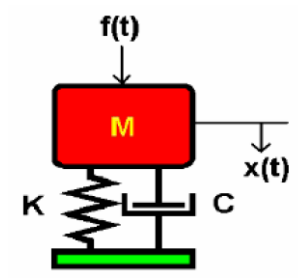


Рисунок 4.10 – Мас-пружинна демпферна система

Теоретично, якщо маса зміщена і звільнена, вона буде продовжувати коливатися з однаковою амплітудою продовж довгого періоду часу. На практиці, маса вібрує з амплітудою, яка поступово зменшується до тих пір, поки не прийде в стан спокою. Це явище називається демпфуванням і воно викликається втратою енергії за допомогою тертя та інших впливів. Демпфування є складним явищем. Для цілей спрощеного моделювання, припустимо, що демпфуюча сила пропорційна швидкості.

Реакція мас-пружинної демпферної системи визначається рівнянням руху, яке є диференціальним рівнянням другого порядку:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [f(t) - c\dot{x} - kx], \quad (4.10)$$

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

Для моделювання зазначеної системи необхідно розглянути умови в дужках. Є три вхідних сигнальних лінії: $f(t)$, \dot{x} та x , що помножуються на константи.

У середовищі Simulink множення реалізується за допомогою блоку Gain. Потім сигнали підсумовуються, як показано на рис. 4.11.

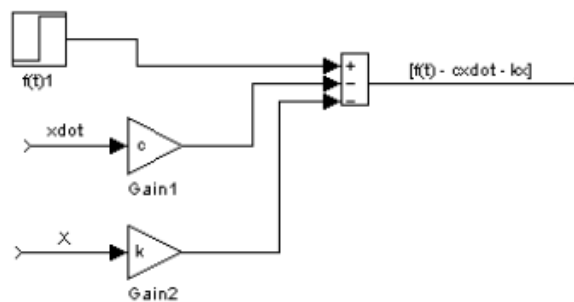


Рисунок 4.11 – Simulink модель підсумовування вхідних сигналів

Вираз в дужках $[f(t) - c\dot{x} - kx]$ помножується на константу $1/m$, що реалізується шляхом передачі сигналу через блок посилення, як показано на рис. 4.12 [11].

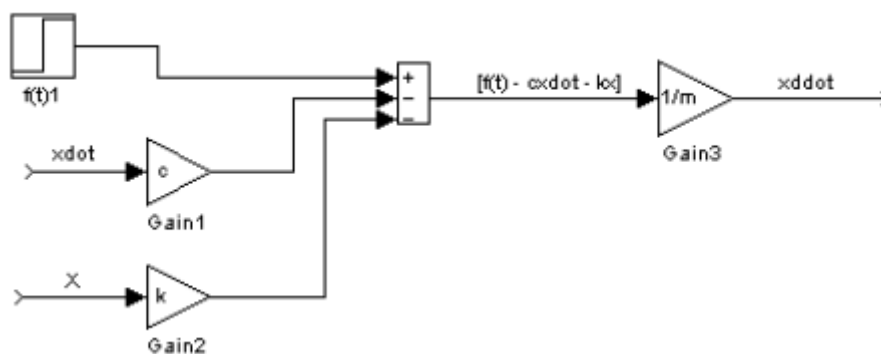


Рисунок 4.12 – Застосування блока Gain для множення

Для отримання вихідного сигналу x виконується подвійне інтегрування вихідного сигналу \ddot{x} , як показано на рис. 4.13.

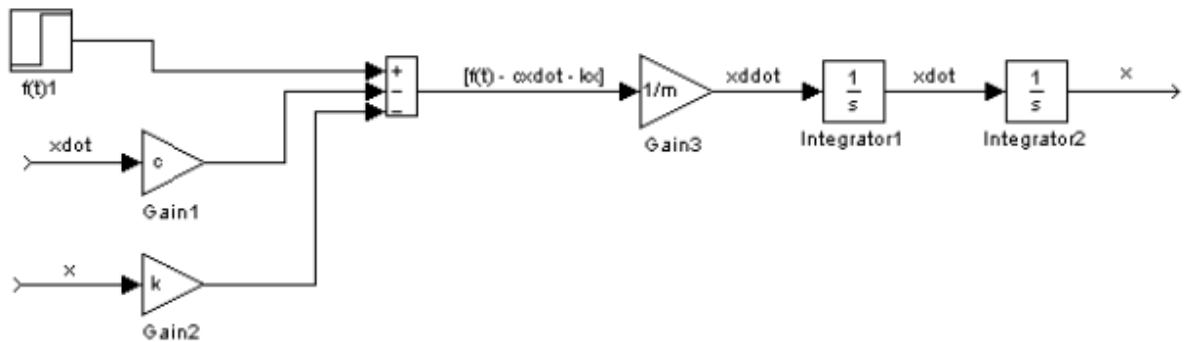


Рисунок 4.13 – Подвійне інтегрування вихідного сигналу

З моделі видно, що \dot{x} і x є входом та виходом моделі. Тому необхідно використовувати петлю зворотнього зв'язку для кожного з цих сигналів. Отримана модель показана на рис. 4.14.

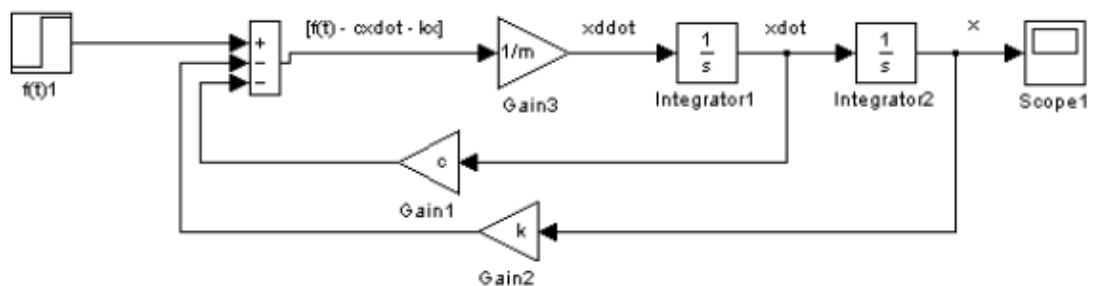


Рисунок 4.14 – Simulink модель SDOF системи

Результати моделювання наведено на рис. 4.15. Оскільки фізична модель акселерометра описується коливальною ланкою, як видно з рисунка, система генерує загасаючий коливальний відгук.

При різних значеннях m , c і k реакція системи другого порядку може бути використана для імітації відгуку системи першого порядку. В цьому випадку система називається «критично-демпфованою».

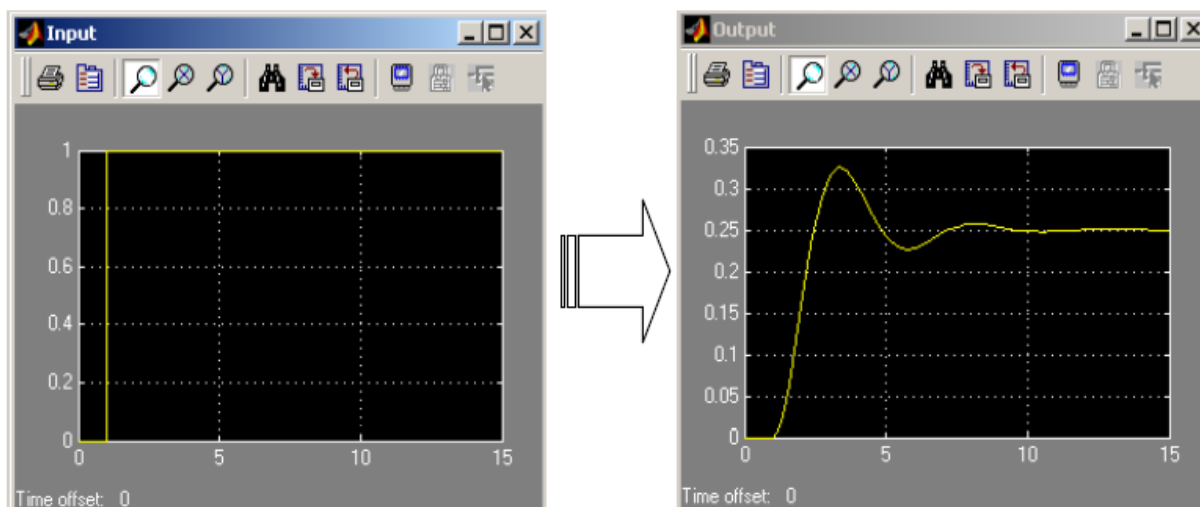


Рисунок 4.15 – Результати моделювання SDOF системи

4.5 Поведінкове моделювання

Найбільш популярним засобом поведінкового моделювання є Simulink, який представляє собою набір інструментів, вбудованих в середовище Matlab [11], що дозволяє виконувати системне моделювання з урахуванням часу.

Розглянемо акселерометр, вбудований в силовий контур зворотного зв'язку, представлений на рис. 4.16 [7,11]. Механічний сенсорного елемент може бути описаний диференціальним рівнянням першого порядку мас-демпферної пружинної системи. Припустимо, що діапазон переміщення контрольної маси обмежений механічним стопером, який має деяке відхилення від положення спокою на початку моделювання.

Вхід представляє собою зовнішню інерційну силу, а виходи - переміщення, швидкість і прискорення маси, як реакція на вхідну силу. Модель сенсорного елемента наведено на рис. 4.16.

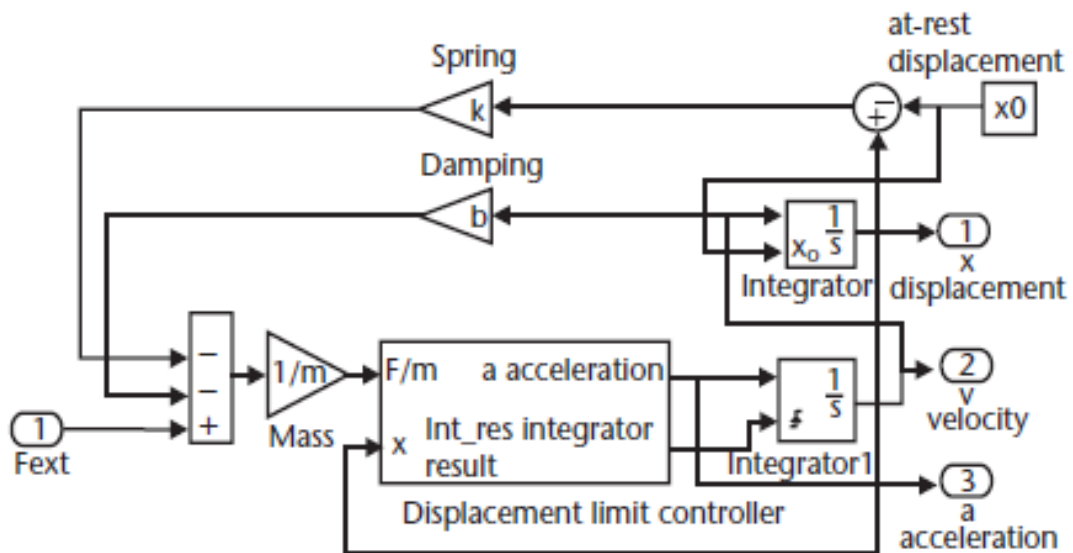


Рисунок 4.16 – Simulink модель сенсорного елемента акселерометра

Модель містить призначений для користувача підмодуль (контролер обмеження переміщення) який має два входи:

- вхідне прискорення, що діє на сенсорний елемент;
- зміщення контрольної маси.

Підмодуль моделює нелінійну поведінку сенсорного елемента в разі, якщо робоча маса торкається механічних стоперів, при цьому, зміщення перевищує деяке значення x_{max} . У цьому випадку швидкість контрольної маси зменшується до нуля, тому Integrator1 скидається в нуль до прискорення в напрямку віддаленому від обмежувача.

Інша особливість моделі полягає в тому, що нульове початкове зміщення контрольної маси може бути задане через x_0 , що визначає початкову умову для другого інтегратора. Сумуючий блок на вході підсумовує всі зовнішні і внутрішні сили, що діють на контрольну масу.

Модель сенсорного елемента як підсистеми сенсорної системи включає контур управління зі зворотним зв'язком по силі. Модель описує динаміку сенсорного елемента, перехід від зсуву до диференціальної ємності і напруги,

сигма-дельта модуляторні блоки управління і схеми зі зворотним зв'язком. Використовується припущення, що робоча маса розміщена між двома електродами конденсатора, зміщення може бути перетворено в диференціальну зміну ємності, що моделюється за допомогою реалізації математичного функціонального блоку рівняння з допомогою паралельних ємностей пластин.

Диференціальна ємність може бути визначена за допомогою електронної схеми вимірювання положення, яка в першому порядку може бути представлена блоком посилення моделі. До складу моделі входять компаратор, зразок і утримувач для моделювання системи управління сигма-дельта. У лінії зворотного зв'язку розраховуються електростатичні сили, що діють на контрольну масу, якщо один з двох електродів включений. Сили зворотного зв'язку підсумовуються з будь-якої зовнішньої інерційної силою, що діє на контрольну масу.

Моделі дозволяє оптимізувати параметри проектування, такі як площа електрода, постійна пружини, робоча маса, необхідний коефіцієнт посилення електричного сигналу і частота дискретизації. Моделі дозволяє зробити прогноз стабільності контуру управління і отримати відношення сигнал - шум. Додаткові ефекти, такі як внутрішні джерела шуму (тепловий шум) можна моделювати шляхом додавання генераторів випадкових чисел; небажані електростатичні сили, що з'являються з-за напруги електричного збудження в схемах електронного інтерфейсу, можуть бути додані до моделі і вивчено їх вплив на характеристики сенсора. Моделювання зазначених ефектів другого порядку значно збільшує час моделювання.

На рис. 4.17 показана Simulink модель сенсорного елемента акселерометра в середовищі Matlab Simulink.

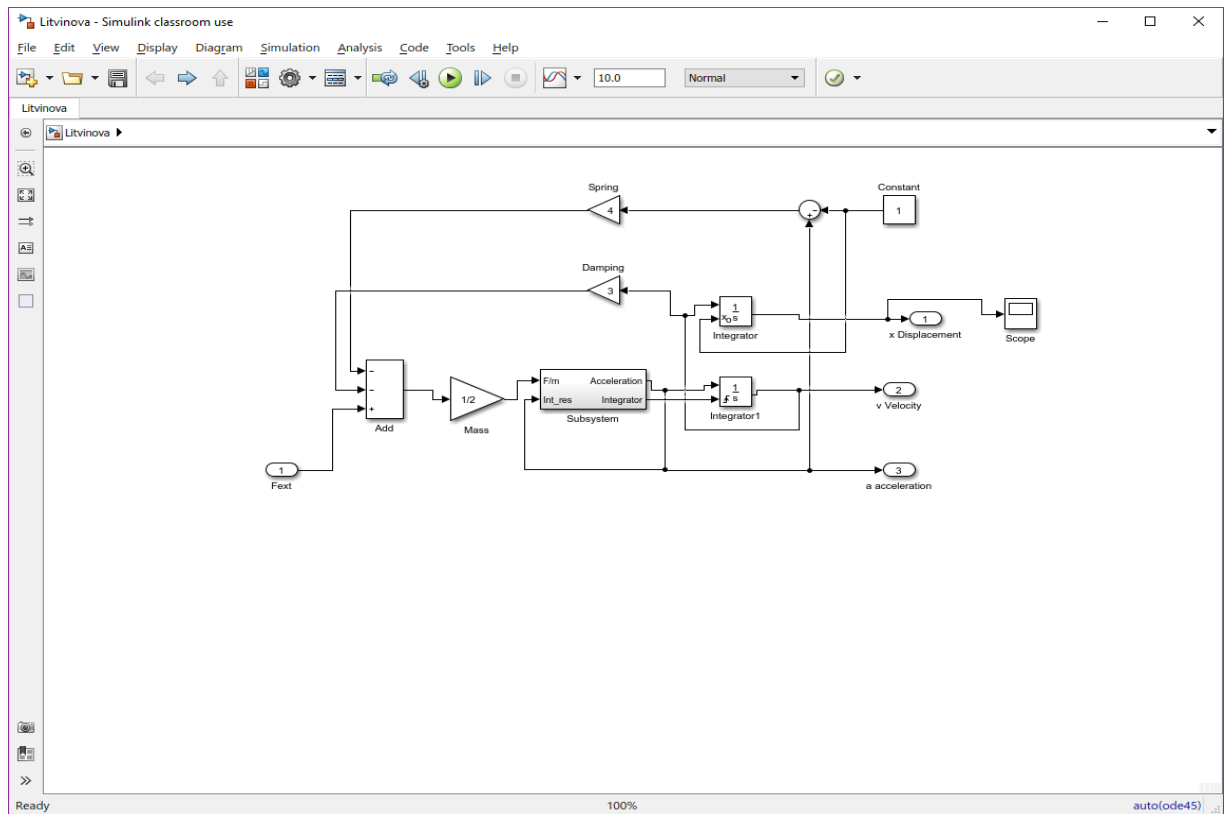


Рисунок 4.17 – Simulink модель сенсорного елемента акселерометра в середовищі Matlab Simulink

Результати моделювання сенсорного елемента МЕМС-акселерометра MMA7371LT наведено на рис. 4.18 – 4.20. Переміщення інерційної маси залежить від зовнішньої сили $f(t)$. Чим більше сила інерції, тим більше переміщення та швидкість.

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

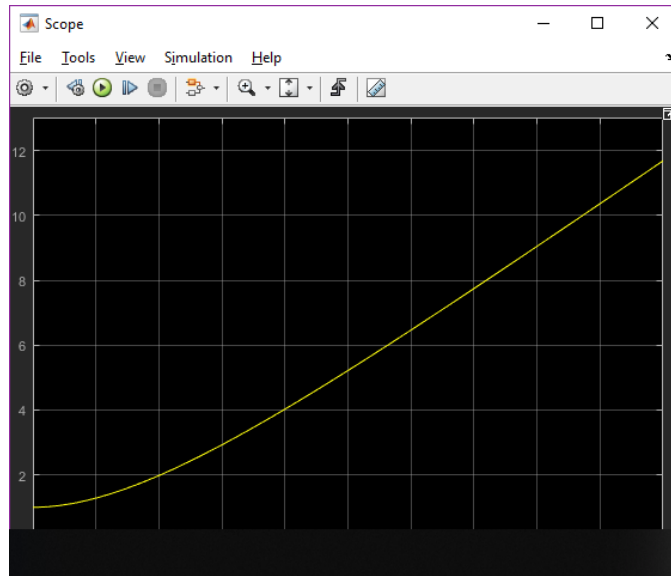


Рисунок 4.18 – Результати моделювання: Displacement – переміщення

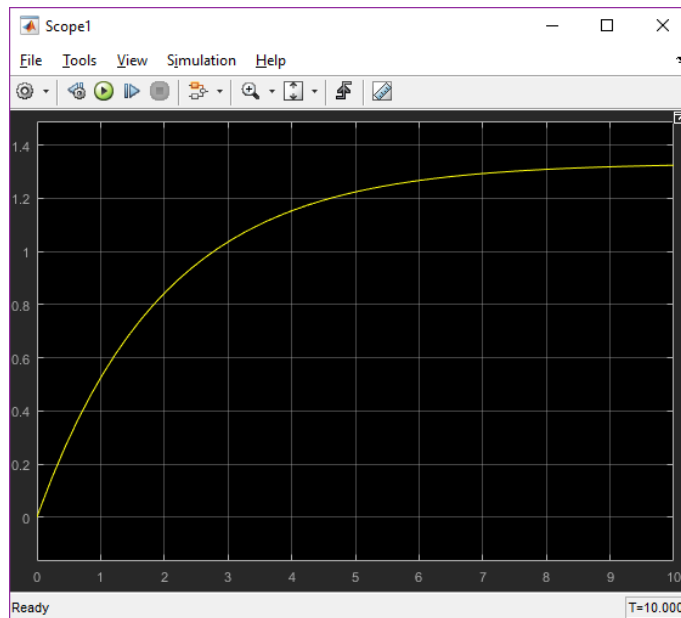


Рисунок 4.19 – Результати моделювання: Velocity – швидкість

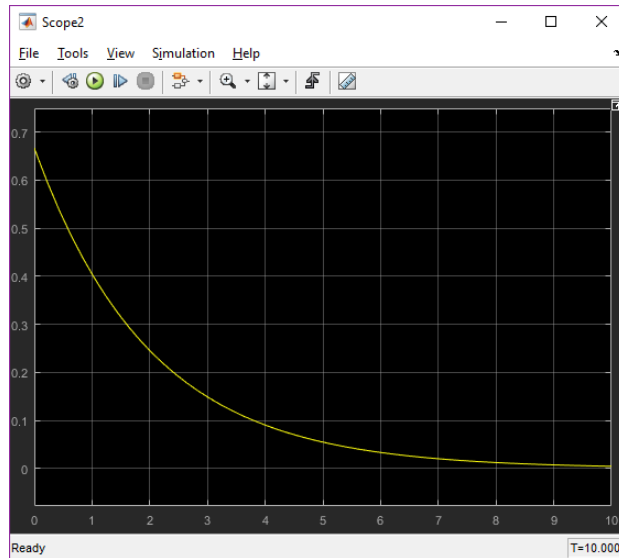


Рисунок 4.20 – Результати моделювання: Acceleration – прискорення

На основі Simulink–моделі SDOF системи було розроблено Simulink–модель механічного компонента ємнісного MEMC–акселерометра (рис. 4.21).

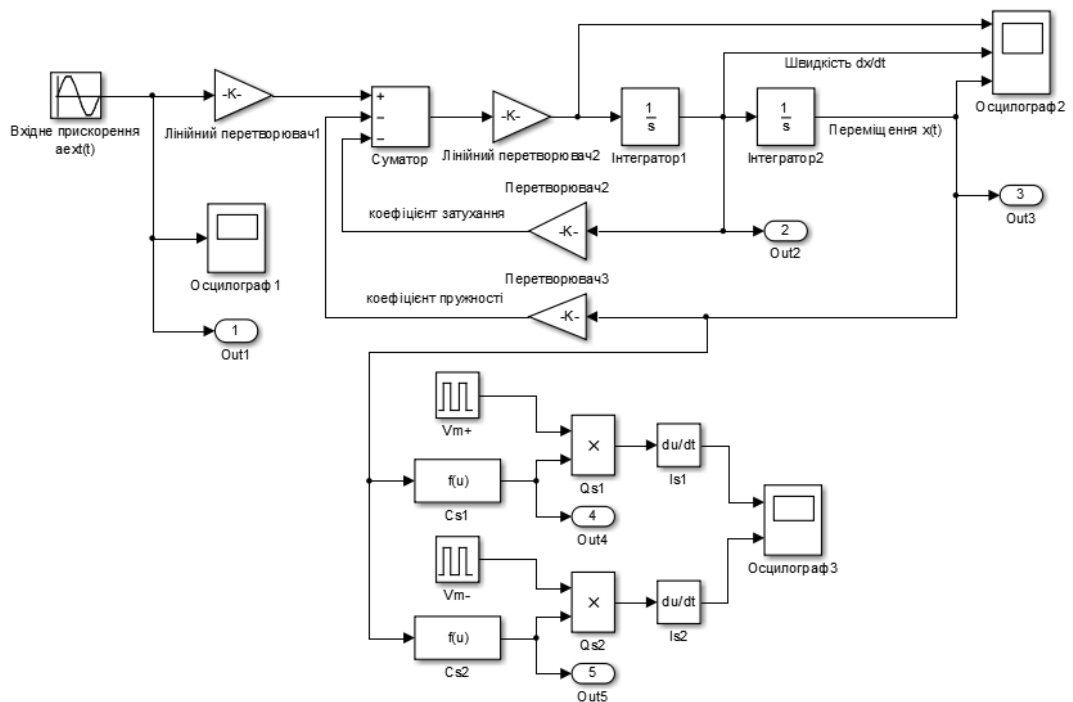


Рисунок 4.21 – Simulink–модель механічного компонента ємнісного акселерометра MEMS

Результати моделювання Simulink–моделі механічного компонента ємнісного МЕМС-акселерометра показані на рис. 4.22 – 4.26.

На рис. 4.22, 4.23 наведено результати моделювання переміщення і відгуку чутливого елемента інерційної маси під дією синусоїдального прискорення з амплітудою 5 g. На графіку можна бачити, що переміщення інерційної маси знаходиться в діапазоні від -50 нм до 50 нм. На рис. 4.24 показано перехідне переміщення стійкої маси під впливом стійкого прискорення 5 g. Графік на рис. 4.25 показує швидкість відгуку і перехід чутливого елемента інерційної маси в нову рівновагу під дією прискорення 5 g. Залежність переміщення сенсорного елемента від прикладеного прискорення в діапазоні $\pm 5g$ має лінійний характер (рис. 4.26)

З отриманих результатів видно, що для таких заданих конструктивних параметрів механічної складової диференціального ємнісного МЕМС-акселерометра необхідні високоточні схеми для обробки таких малих змін вихідних сигналів. Подібні результати отримані в роботах [12].

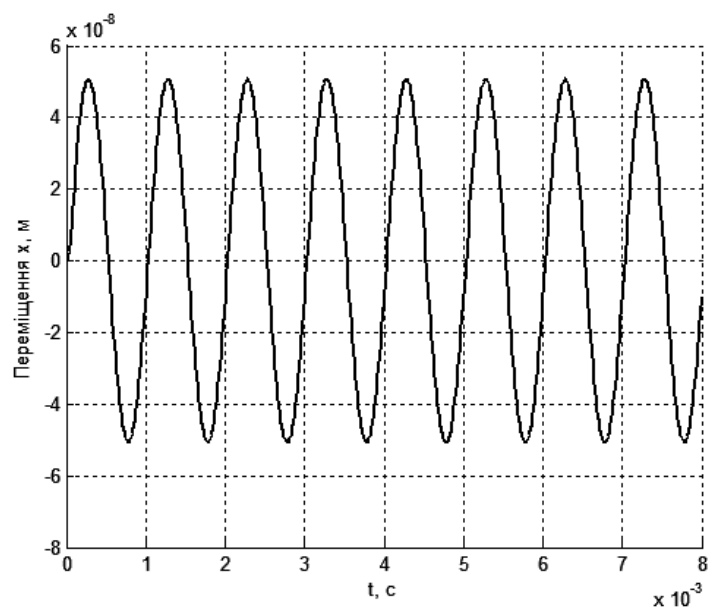


Рисунок 4.22 – Переміщення сенсорного елемента акселерометра $x(t)$, що викликаний дією прикладеного прискорення в синусоїдальній формі з амплітудою 5g

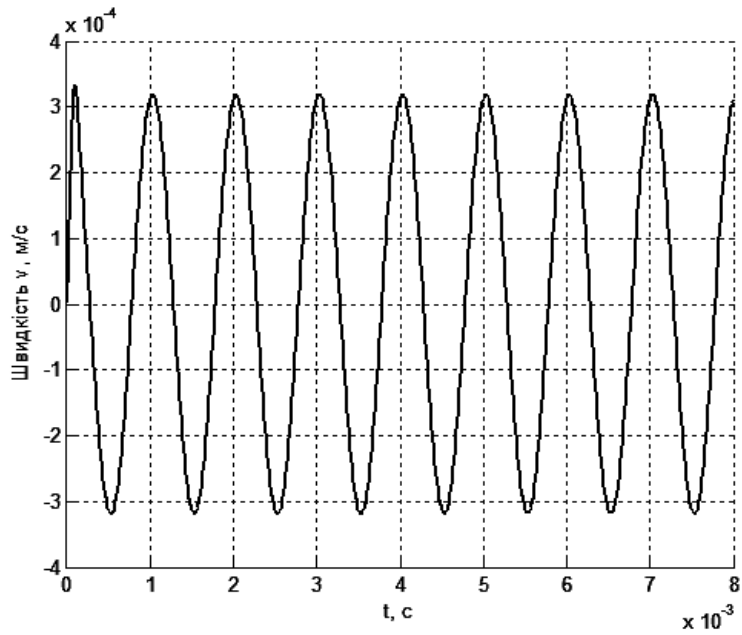


Рисунок 4.23 – Швидкість сенсорного елемента $v(t)$, коли застосовується зовнішнє прискорення з амплітудою $5g$

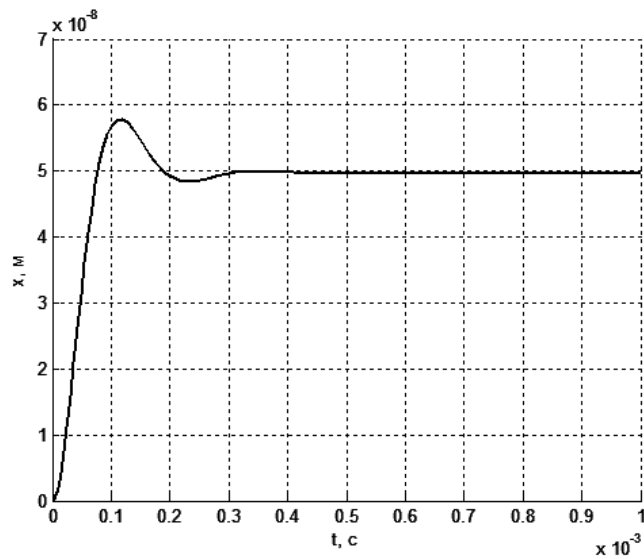


Рисунок 4.24 – Переміщення сенсорного елемента, коли зовнішнє прискорення застосовується з амплітудою $5g$

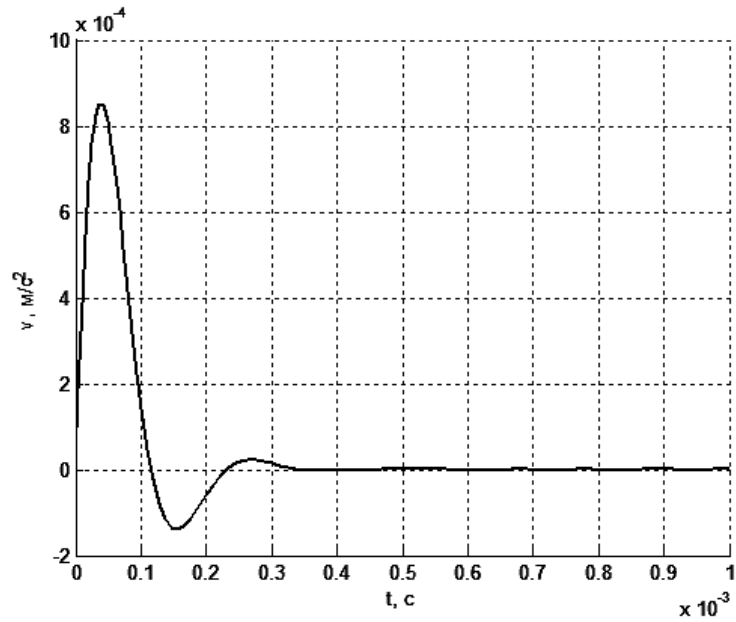


Рисунок 4.25 – Відгук сенсорного елемента на дію прикладеного прискорення $5g$

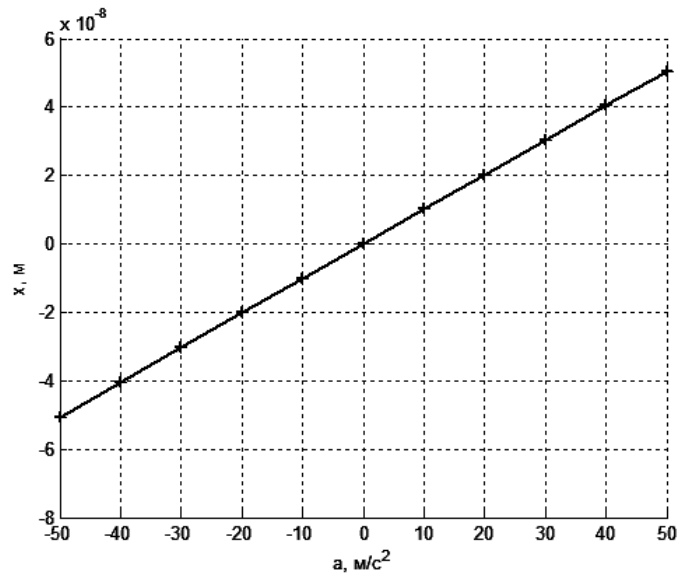


Рисунок 4.26 – Залежність переміщення сенсорного елемента від прикладеного прискорення в діапазоні $\pm 5g$

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проведено аналіз особливостей проектування MEMC–акселерометрів. MEMC проходять стадію розробки, що включає в себе аналітичне математичне моделювання за допомогою пакетів прикладних програм, таких як ANSYS, Matlab стадію виготовлення методом групової технології.

Проведено аналіз загальної структури мікросистеми. Розглянуто класифікацію MEMC-акселерометрів та виконано аналіз принципів їх роботи в рухомих об'єктах.

Виконано розробку та аналіз фізичної моделі акселерометра та отримано рівняння динаміки акселерометра лінійних прискорень з поступальним переміщенням чутливого елемента, передавальні функції акселерометра по каналу «прискорення – переміщення інерційної маси» та каналу «прискорення - вихідна напруга».

Проведено аналіз електричної моделі акселерометра ємнісного типу, отримано вирази для електричних ємностей конденсаторів, математично доведено залежність приросту заряду від зміни відстані між обкладинками конденсатору, що є нелінійною та отримано вираз залежності напруги на рухомих обкладинках конденсаторів від переміщення, яка має лінійний характер.

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

Розроблено Simulink–модель механічного компонента SDOF системи та Simulink–модель ємнісного MEMC–акселерометра. При проведенні поведінкового моделювання отримані графіки залежностей, що підтверджують отримані математичні моделі акселерометра.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Михайло Лобур, Михайло Мельник. Основи мікросистемних пристроїв. // Навчальний посібник. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2016.– 258 с.
2. Сысоева С. Три уровня автомобильных сенсорных инноваций: макро, микро и нано. / С. Сисоева // Компоненты и технологии. – № 1. – 2010.
5. Introduction and application areas for MEMS. Електронний ресурс: <https://cyberleninka.ru/article/n/tri-urovnya-avtomobilnyh-sensornyh-innovatsiy-makro-mikro-i-nano>.
3. Чуклін Н.О., Ларченко Л.В. Огляд динаміки ринку МЕМС для сфер промисловості. / Н.О. Чуклін, Л.В. Ларченко // СХІІІ Міжнародна інтернет-конференція «Розвиток науки та техніки під час воєнного стану». – м. Херсон, 28 листопада, 2022.– С. 294-296.
4. Петро Кособуцький, Михайло Лобур, Світлана Чумаченко. Статистичне проектування мікроелектромеханічних систем: Навчальний посібник. // Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2016. – 228 с.
5. Ivan Ivanov, Valeriy Skryshevsky. Application of Microsystems devices. Tutorial // Навчальний посібник: Київ. - 2016.– 374 с.
6. В.Теслюк, А.Зелінський, В.Каркульовський, Я.Василюк. Розширене проектування мікросистемних пристроїв: // Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2016. – 200с.
7. S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White. MEMS Mechanical Sensors. // Artech House, Inc. Boston - London. – 2004. – 281 с.
8. 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. – August-2012. – pp. 305-311.

9. Modeling first and second order systems in simulink. Електронний ресурс.

http://www.science.smith.edu/~jcardell/Courses/EGR326/Modeling_1st2nd_order_systems.pdf

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

11. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК_Пресс, 2008. – 784 с.