

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)

Методи побудови моделей сенсорних MEMS-компонентів  
з використанням пакету Matlab/Simulink

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання групи СКСм-23-1  
Мошунів Д.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. Шкіль О.С.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри АПОТ

  
(підпис)

Чумаченко С.В.  
(прізвище, ініціали)

2025 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)

“3” 09 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві Мошуну Дмитру Олексійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи побудови моделей сенсорних MEMC-компонентів з використанням пакету Matlab/Simulink

затверджена наказом по університету від "08" 11 2024 р. № 1189 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.01.2025

3. Вихідні дані до роботи

Математичний процесор MATLAB

Програмний пакет Simulink

Бібліотека Matlab/Simulink/Simscape

MEMC-акселерометр ADXL325

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1 Аналіз сучасного стану мікросистемної техніки

2 Аналіз конструкції, математична та електрична моделі MEMC-акселерометра

3 Розробка Simulink-моделі сенсорного компонента MEMC-акселерометра

4. Розробка Simulink-моделі MEMC-акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулюванням та поведінкове моделювання в середовищі Matlab/Simulink

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

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

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	Дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	02.09.2024 - 03.09.2024	
2	Аналіз предметної області	04.09.2024 - 09.09.2024	
3	Огляд джерел з проблемної галузі	10.09.2024 - 24.09.2024	
4	Аналіз механічної моделі та електричної моделі ємнісного акселерометра	25.09.2024 - 03.10.2024	
5	Структури МЕМС-акселерометрів звмкнутого контуру з ПІ- та ПІД-регулюванням	04.10.2024 – 15.10.2024	
6	Розробка Simulink-моделі сенсорного компонента МЕМС-акселерометра	16.10.2024 - 23.10.2024	
7	Розробка Simulink-моделі МЕМС-акселерометра замкнутого контуру з ПІД-регулюванням	24.10.2024 - 05.11.2024	
8	Моделювання в середовищі Matlab/Simulink	06.11.2024 -20.11.2024	
9	Оформлення пояснювальної записки	20.11.2024 - 20.12.2024	
10	Перевірка виконаного проекту керівником	20.12.2024 -20.12.2024	
11	Захист кваліфікаційної роботи	01.01.2025 -20.01.2025	

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

доц. Шкіль О.С.

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 72 сторінки 32 рисунка, 2 таблиці, 14 джерел за переліком посилань.

МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, ІНЕРЦІЙНИЙ МЕМС-СЕНСОР, АКСЕЛЕРОМЕТР, ПРИСКОРЕННЯ, ПІД-КОНТРОЛЕР, ФНЧ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, SIMULINK-МОДЕЛЬ

В кваліфікаційній роботі проаналізовано сучасний стан розвитку МЕМС-пристроїв, розглянуто загальну структуру мікросистеми, використання МЕМС-акселерометрів у транспортних засобах. Розглянуто принцип роботи МЕМС-акселерометра та математичний опис механічної та електричної складових акселерометра. Розглянуто структуру акселерометра з ПІ- та ПІД-регулюванням, проаналізовано передавальні функції блок-схеми акселерометра з ПІД-регулятором та похідним ФНЧ.

В роботі розглянуто етапи проєктування МЕМС-акселерометрів. Розроблено Simulink-модель сенсорного компонента акселерометра та її поведінкове моделювання в середовищі Matlab/Simulink. Створено Simulink-модель акселерометра замкнутого контуру з одиничним зворотним зв'язком, яка містить ПІД-регулятор та ФНЧ, що використовується з метою подолання похибки перехідного процесу і забезпечення стабільності роботи у стаціонарному режимі, проведено моделювання як в часовій, так і у частотній областях з метою відстеження транспортного засобу.

## ABSTRACT

The explanatory note contains 72 pages, 32 figures, 2 tables, 14 sources by the list of references.

MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, INERTIAL MEMS-SENSOR, ACCELEROMETER, ACCELERATION, PID-CONTROLLER, LPF, MATHEMATICAL MODELING, SIMULINK-MODEL

In the qualification work, the current state of development of MEMS devices was analyzed, the general structure of the microsystem and its components, the use of MEMS accelerometers in vehicles were considered. The working principle of the MEMS accelerometer and the mathematical description of the mechanical and electrical components of the accelerometer are considered. The structure of the accelerometer with PID control was analyzed, the transfer functions of the accelerometer structure with PID controller were considered.

Simulink-model of the accelerometer sensor component and its behavioral modeling in the Matlab/Simulink environment are developed. A Simulink model of a closed-loop accelerometer with unitary feedback was created, which contains a PID controller and a low-pass filter, which is used to overcome the error of the transient process and ensure the stability of operation in the stationary mode. Modeling was carried out in both the time and frequency domains for the purpose of vehicle tracking.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ.....	10
1.1 Дослідження ринку сенсорних компонентів МЕМС.....	10
1.2 Загальна структура МСТ-пристрою.....	14
1.3 Сенсорні МЕМС-компоненти – мікроакселерометри.....	18
1.4 Інерційні МЕМС-сенсори у транспортних засобах.....	20
1.5 Мета та постановка завдання.....	23
2 МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРИ ЗАМКНУТОГО КОНТУРУ.....	25
2.1 Принцип дії та рівняння динаміки акселерометра.....	25
2.2 ПІ- та ПІД-регулювання в МЕМС-акселерометрах замкнутого контуру.....	31
2.3 Корекція системи управління МЕМС-акселерометра замкнутого контуру з використанням похідного фільтра.....	40
2.4 Модель акселерометра з відкритим контуром.....	41
2.5 Модель акселерометра замкнутого контуру.....	45
3 МОДЕЛЮВАННЯ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА ЗАМКНУТОГО КОНТУРУ В MATLAB/SIMULINK.....	52
3.1 Методологія проєктування та моделювання МЕМС-акселерометрів.....	52
3.2 Пакет Matlab/Simulink для дослідження динамічних моделей.....	55
3.3 Simulink-модель сенсорного компонента МЕМС-акселерометра та поведінкове моделювання.....	58
3.4 Simulink-модель МЕМС-акселерометра замкнутого контуру з ПІД-регулятором та результати моделювання.....	62
3.5 Simulink-модель акселерометра замкнутого контуру з похідним ФНЧ та результати моделювання.....	65

ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	71
ДОДАТОК А Графічна частина кваліфікаційної роботи.....	73
ДОДАТОК Б Тези доповіді.....	82

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВС – вбудована система

ІМ – інерційна маса

МЕМС – мікроелектромеханічні системи

МСТ – мікросистемна техніка

ПІД-регулятор – пропорційно інтегрально диференціальний регулятор

САПР – система автоматизації проектування

ФНЧ – фільтр низьких частот

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ЧЕ – чутливий елемент

CMOS (Complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor) – технологія побудови логічних електронних схем КМОН

INS (inertial navigation system) – інерціальна навігаційна система

IoT (Internet of Things) – Інтернет речей

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

PVA (position-velocity accelerator) – позиційно-швидкісний прискорювач

RTK-GPS (Real Time Kinematic - Global Positioning System) – сукупність прийомів і методів отримання координат в реальному часі та система глобального позиціонування

## ВСТУП

Одним з науково-технічних напрямів, що надалі стрімко розвиваються, є мікроелектромеханічні системи (МЕМС), які об'єднують у собі механічні та електричні компоненти та являють собою мікромініатюрні вбудовані інформаційно-керуючі системи. МЕМС відповідають таким вимогам, як інтелектуальність, багатофункціональність, висока чутливість, точність, надійність, низька вартість виробів завдяки сучасним груповим технологіям виробництва. МЕМС характеризуються мікро- та нанорозмірами і знаходять обширне застосування у багатьох галузях.

Значну частину сенсорних МЕМС-компонентів, які є перспективними та динамічно розвиваються, складають інерційні сенсори, зокрема, акселерометри, що призначені для визначення динамічної поведінки об'єкта. Динамічна поведінка об'єкта залежить від впливу інерційних сил, які викликають прискорення в одному чи кількох напрямках.

На даний час до інерційних МЕМС-акселерометрів і надалі збільшуються вимоги до технічних характеристик. Впровадження в інерційні сенсори замкнутого контуру з паралельним пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) регулюванням дозволяє покращити їх характеристики, такі як збільшення стабільності акселерометрів, пропускну здатності та динамічного діапазону, а використання у складі акселерометрів похідного фільтру зменшує похибку керування встановленого режиму та покращує стійкість системи.

У даний час актуальним завданням є розробка методів, моделей компонентів МЕМС та алгоритмів для підвищення ефективності та скорочення часу їх автоматизованого проектування. При проектуванні, моделюванні та аналізу МЕМС-акселерометрів широко використовують різні сучасні інструментальні засоби, зокрема, програмний пакет Matlab/Simulink.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка методів побудови моделей МЕМС-акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулюванням та похідним фільтром з використанням пакету Matlab/Simulink та дослідження їх поведінкового моделювання. При моделюванні застосовується принцип «переміщення-швидкість-прискорення» для перетворення прискорення транспортного засобу у відстань (переміщення).

## 1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ

У даному розділі проведено аналіз динаміки ринку МЕМС-сенсорів, області їх використання, приведено структуру мікросенсора, загальну структуру МСТ-пристрою, використання МЕМС-акселерометрів у транспортних засобах, сформульовано мету і постановку завдання.

### 1.1 Дослідження ринку сенсорних компонентів МЕМС

Відомий американський фізик-теоретик Річард Фейнман сказав, що існує дивовижно складний світ малих форм і коли-небудь люди будуть дивуватись, що в середині 20 століття ніхто не ставився серйозно до досліджень цього світу.

Аналіз сучасного стану розвитку систем техніки нових поколінь та «критичних» технологій демонструє, що одним з найбільш важливих революційних науково-технічних напрямів, які у даний час надалі швидко розвиваються, є мікросистемна техніка (МСТ) і створювані на її базі МЕМС. МЕМС представляють собою мікросистеми найрізноманітніших конструкцій і мають широкий спектр призначень та які виготовлені при використанні певних технологій мікрооброблення та групової технології [1].

При здійсненні оцінки сучасного стану розвитку МСТ важливим моментом є фактори, які стимулюють появу нових МСТ-пристроїв різного призначення:

- наявність наукової бази, технологій виробництва та сучасного устаткування, що є основою потужностей та інфраструктури МСТ виробництва;
- перспективний ринок МСТ різного призначення, який динамічно зростає;

- направленість до інтеграційних процесів, зокрема, мікро- та біотехнологій в області біоніки і принципів роботи мікросистем та сучасних, у тому числі і нових матеріалів, які використовуються при виконанні МСТ;
- поява покоління нейроподібних інтегральних схем, які забезпечують новий рівень «інтелектуальних» мікросистем і їх компонентів;
- удосконалення швидкодіючих мікросистем та покращення масогабаритних і енергетичних показників;
- перспективи ринку, що стрімко розвивається, у галузі медичних мініатюрних систем, спрямованих на збереження здоров'я людини.

Означене вище говорить про те, що вироби МСТ є компонентами інтелектуальних систем значної складності і найбільше використовуються у таких галузях, як авіаційна, аерокосмічна та військова техніка, робототехніка, побутова електроніка, автомобілебудування, а також, медичне обладнання, біотехнології, аналітичні однокристалні МЕМС-лабораторії, прилади збирання енергії тощо.

Сьогодні світовий ринок МСТ, зокрема МЕМС, стрімко прогресує та змінюється динамічно. По мірі розвитку, зростання популярності і впровадженню «Інтернету речей» (IoT) необхідність у МЕМС-пристроях значно зростає, а також зростають обсяги ринку МЕМС у галузі споживчої електроніки та провідних галузях - авіаційна, аерокосмічна, військова техніка, автомобілебудування [2]. До 2022 року обсяг ринку МЕМС збільшувався приблизно на 16% щороку, внаслідок того, що МЕМС та сенсорні і актюаторні компоненти мають велику комерційну привабливість.

На даний час через макроекономічну ситуацію, яка зумовлена впливом подій та процесів у всьому світі, за останні 2 роки динаміка зростання ринку МЕМС уповільнилась. У 2023 році ринок МЕМС зменшився до \$14,6 млрд, тобто спостерігалось зниження на -3% порівняно з попередніми роками, головним чином, через спад споживчої електроніки та економічні цикли, але у 2024 році знову існує наявність зростання приблизно до \$15,6 млрд.

Згідно досліджень консалтингової компанії Yole Development з точки зору довгострокового періоду до 2029 року прогнозується постійне зростання потреби у MEMS-пристроях та їх компонентах, головним чином, завдяки мегатенденціям, що спостерігаються на сьогодні – це сенсоризація пристроїв споживчої електроніки, автономне водіння та комфорт, зокрема, у транспортних засобах, використання штучного інтелекту тощо. Таким чином, очікується, що до 2029 року сукупний середньорічний темп зростання CAGR за період 2023-2029 роки буде на рівні 5% і зростання досягне майже \$20 млрд. На рис. 1.1 представлений огляд динаміки зростання ринку MEMS впродовж 2023-2029 років для сфер промисловості. На діаграмі видно, що найбільша динаміка зростання очікується у аерокосмічній, автомобільній, промисловій та споживчій галузях.

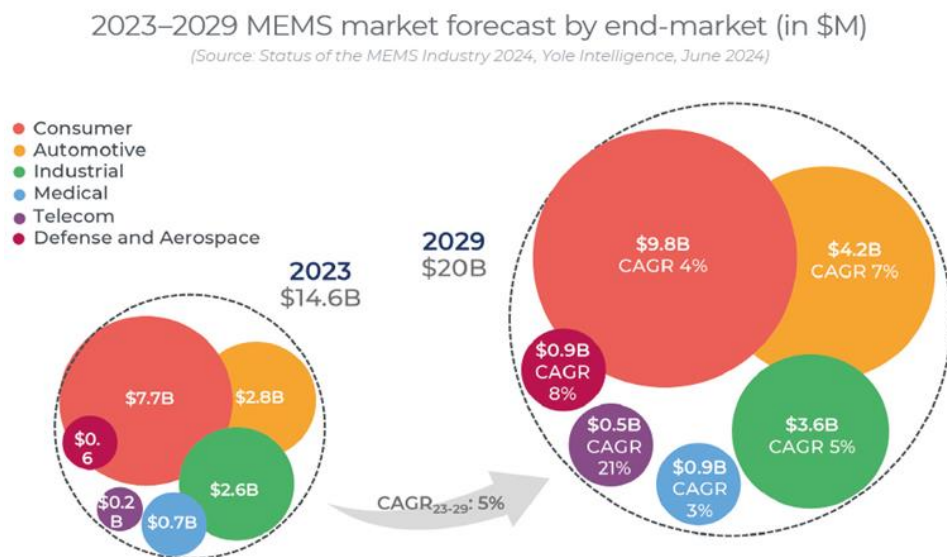


Рисунок 1.1 - Динаміка зростання ринку MEMS для сфер промисловості

При цьому на даний момент і надалі спостерігається динаміка подальшого зростання виробництва існуючих та новітніх розробок MEMS-пристроїв: RF MEMS, інерційних MEMS - акселерометрів, гіроскопів, а також сенсорів тиску, оптичних MEMS, мікродозаторів рідини, ДНК-чипів, осциляторів та MEMS для моніторингу навколишнього середовища. Дійсно,

MEMC складають біля 30% від загальної вартості ринку MEMC-сенсорів і мікроактюаторів. Внаслідок прогресу у розробці та виробництві MEMC і напівпровідникових сенсорів у поєднанні зі зростанням обчислювальної потужності, MEMC використовуються в системах доповненої і віртуальної реальності, а також у транспортних засобах, 3D-зондуванні, зв'язку 5G та робототехнічних системах.

На рис. 1.2 представлено діаграму, яка демонструє зростання ринку інерційних MEMC-сенсорів для військової, аерокосмічної, споживчої галузей та автомобілебудування. За діаграмою ринок інерційних MEMC-сенсорів до 2027 року може збільшитись збільшиться до \$4,5 млрд, що дорівнює приблизно 6,5% CAGR (сукупного середньорічного темпу зростання).

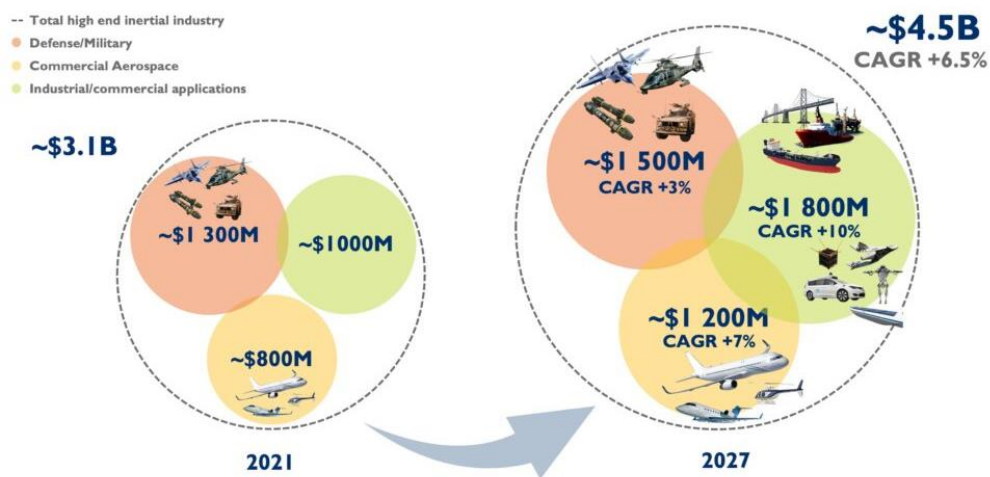


Рисунок 1.2 – Діаграма зростання ринку інерційних MEMC-сенсорів на найближчі роки

Значну частину сенсорних компонентів MEMC складають інерційні сенсори - акселерометри та гіроскопи. За останні роки інерційні сенсори були удосконалені та мають більші показники стабільності та повторюваності. У споживчих і автомобільних системах дуже поширене використання інерційних MEMC-сенсорів. Інерційні цифрові та аналогові MEMC-

акселерометри і гіроскопи також використовуються у промисловій, аерокосмічній та оборонній галузях.

Інерційні MEMC-сенсори характеризуються високою продуктивністю, мають низьку потужність і вартість, та у даний час вбудовані у більшість споживчих програм. Крім того, вони використовуються в літальних апаратах, автомобілях, судах, подушках безпеки, смартфонах, та інших об'єктах. В інерційних навігаційних системах (INS) для визначення параметрів транспортного засобу, як-от положення об'єкту, його орієнтації та швидкості використовують гіроскоп та акселерометр у поєднанні із системами позиціонування (GPS).

## 1.2 Загальна структура МСТ-пристрою

Технічний прогрес іде вперед, і одним з напрямків його розвитку є подальша мікромініатюризація. MEMC являють собою інтегровані пристрої, які виконані за допомогою групової технології мікрообробки та містять у своєму складі мікросенсори (давачі), приводи, мікроактюатори (виконавчі механізми) та компоненти електроніки.

Створення високоефективних інтелектуальних технічних засобів для керування, контролю, а також моніторингу та діагностики у різних галузях застосування є основною метою МСТ. Отже, мікросистеми реалізують процес перетворення енергії різних видів за допомогою сенсорних компонентів - мікросенсорів і, зазвичай, містять первинні чутливі елементи (ЧЕ), які є перетворювачами певних фізичних параметрів середовища у електричні сигнали, або пристроями, що виконують перетворення сигналів у сигнали, які поступають на виконавчі компоненти мікросистеми – актюатори. Прикладами актюаторів є мікродвигуни, мікродзеркала, сопла, редуктори тощо. Мікросистеми містять електронні пристрої обробки сигналів, що включають підсилювачі сигналів, комутатори, цифро-аналогові та аналого-цифрові перетворювачі, фільтри, пристрої пам'яті та інші компоненти.

Первинний ЧЕ є складовою сенсора і взаємодіє з об'єктом вимірювання безпосередньо, у якому фізичний параметр зовнішнього середовища (об'єкту) перетворюється у електричний сигнал. На сучасному етапі розвитку МСТ можна виділити МЕМС-сенсори деформації, переміщення, прискорення, кутової швидкості, крутильного моменту, тиску, температури тощо

Мікросенсором або мікродавачем є перетворювач, в якому фізичний параметр зовнішнього середовища (об'єкту) перетворюється у електричний сигнал. Структуру мікросенсора (мікродавача) мікросистеми приведено на рис. 1.3 [4]



Рисунок 1.3 – Структура мікросенсора

Мікроактюатор - це перетворювач, що за рахунок енергії деякого виду змінює параметри певних зовнішніх об'єктів (рис. 1.4). У сучасній мікросистемній техніці знаходять широке використання електромеханічні актюатори, які можуть бути поділені на три класи. Перший клас - індуктивні актюатори, в яких робота виконується за допомогою магнітних полів. Другий клас: ємнісні або електростатичні актюатори, в яких за допомогою електричного поля виконується робота актюатора. Третій клас актюаторів - це індуктивно-ємнісні виконавчі пристрої, робота яких здійснюється магнітним та електричним полями.



Рисунок 1.4 – Схема актюатора

Мікросистеми являють собою сукупність мікроелектронних керуючих і виконавчих компонентів, що здійснюють певну функцію та мають єдине конструктивне виконання на одному кремнієвому чіпі, представляють собою з'єднання механічних компонентів, сенсорів (давачів), а також приводів та електронних компонентів.

Мікросистеми мають різні принципи дії, які засновані на певних процесах, як-от електромеханічних, електрофізичних, електронно-оптичних, електрохімічних, фотохімічних та інших з урахуванням масштабування при здійсненні переходу від мікро- до нанорозмірів. Вони призначені для того, щоб реалізувати функції прийому інформаційних сигналів, їх перетворення, зберігання, передачі інформації, енергії і руху для здійснення функції призначення у заданих умовах експлуатації.

Мікросистеми у функціонально завершеному вигляді - це інформаційно-керуючі системи певного призначення, структура яких об'єднує підсистеми збору і обробки інформаційних даних, що в результаті обробки видають сигнали дії на актюатори, що являють собою виконавчі пристрої, і надалі подають сигнали на об'єкт керування. На рис.1.5 зображено схематичну взаємодію мікросистеми з об'єктом керування.



Рисунок 1.5 – Взаємодія мікросистеми з об'єктом керування

Електронні підсистеми керування та обробки сигналу мікросистем являють собою інтелектуальні пристрої, що реалізуються на основі універсальних електронних схем: мікропроцесорів, АЦП, ЦАП, пристроїв пам'яті, та інших мікросхем, які програмуються виробником або користувачем. Загальна структура МСТ-пристрою приведена на рис. 1.6.

Структура містить наступні складові:

- вхідний перетворювач,
- мікропроцесор – пристрій, призначений для обробки, збереження та передачі інформації,
- вихідний перетворювач.

В загальній структурі мікросистема містить сенсор (давач), який здійснює перетворення вхідних фізичних, хімічних та інших величин у електричний сигнал. Отриманий інформаційний сигнал, як правило - аналоговий. Отже, наступний модуль МСТ-пристрою виконує функцію приведення сигналу аналогового до потрібного рівня з подальшим перетворенням його у цифрову форму. Дану операцію виконує АЦП.

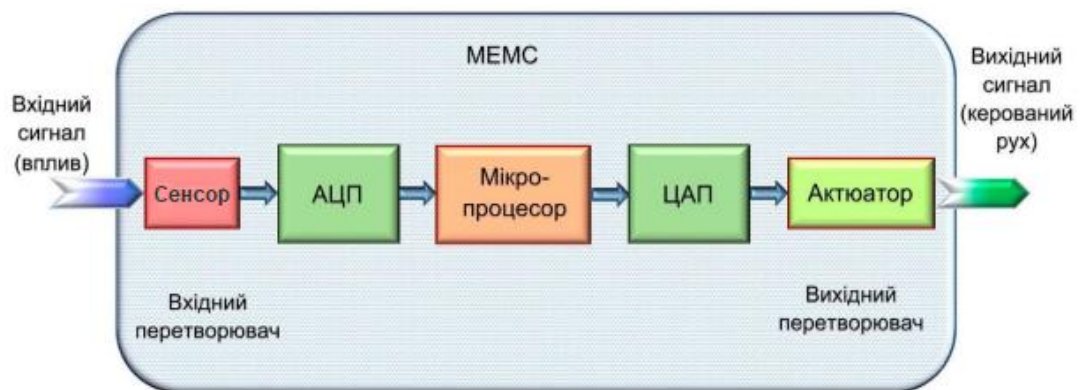


Рисунок 1.6 – Загальна структура МСТ-пристрою

Мікропроцесорні засоби, що входять у склад МСТ-пристрою, здійснюють обробку отриманої цифрової форми вхідного сигналу у

відповідності із заданим алгоритмом. У склад модуля МСТ-пристрою можуть входити контролери, мікропроцесори, процесори сигналів, а також запам'ятовувальні пристрої і цифрові схеми. Вихідний інформаційний сигнал з блоку мікропроцесорних засобів - це генерація керуючого цифрового сигналу чи групи керуючих сигналів, що перетворюється в аналогову форму сигналу за допомогою ЦАП. У деяких мікросистемах модуль «актюатор» може бути відсутній. Надалі сигнал направляється на пристрій розподілу аналогових і цифрових сигналів, у складі якого є аналогові комутатори, а також, демультіплексори, буферні регістри та інші елементи. З пристрою розподілу аналогових і цифрових сигналів сигнал передається на актюатор. У багатьох мікропроцесорах, у якості вхідного електричного параметра, можуть виступати такі величини, як зміна частоти, напруги, опору, ємності, струму та інші параметри.

### 1.3 Сенсорні МЕМС-компоненти – мікроакселерометри

Сенсором називають пристрій, що сприймає і перетворює фізичну величину - тиск, рух, світло, інерцію та інші фізичні величини у електричний сигнал. При цьому сенсор здійснює вимірювання величини електронним способом та надалі здійснює функціональну обробку сигналу, а іноді здійснювати генерацію сигналів на певні керовані процеси. Електричний сигнал далі передається шляхом ліній зв'язку. Електричні сигнали напруга, струм або заряд сенсорів мають характеристики - амплітуду частоту, фазу або цифровий код.

Однією з галузей, де знайшли широке застосування інерційні МЕМС-сенсори, є автомобілебудування. Інерційні сенсори призначені для того, щоб характеризувати динамічну поведінку об'єкта, яка здійснюється за допомогою вимірювання сил інерції при дії на конкретний об'єкт. Лінійне прискорення є вимірюваною величиною, що отримують за допомогою акселерометра.

Мікроакселерометр - це мікроелектромеханічний сенсор, призначений для вимірювання прискорення рухомого об'єкта. Прискорення вимірюється у силі тяжіння  $g$ . Вимірювана величина  $g$  може бути перетворена на швидкість та положення (переміщення).

У даний час акселерометри у комбінації з гіроскопами є складовими інерційних вимірювальних пристроїв (IMU), що призначені для моніторингу динаміки об'єктів. Серед багатьох застосувань інерційні МЕМС-сенсори використовуються у інерціальних навігаційних системах для повітряних і наземних транспортних засобів.

Використання акселерометрів надає широкий спектр послуг у сенсі прогнозування різних процесів. Існують спеціальні системи спостереження, що використовуються в системі управління мостами та безпеки землі. Система спостереження RTK-GPS – це система, яка має у складі тривісний акселерометр та глобальну кінематичну систему позиціонування в реальному часі. Прикладом такої системи є система спостереження, що встановлена на мосту Ноттінгем Вілфорд (Великобританія). Основною метою системи RTK-GPS є визначення динамічних характеристик рухомої палуби моста у режимі реального часу, зокрема, для вимірювання низькочастотних коливань середнього прольоту підвісного моста.

Іншою сферою застосування є носимі пристрої, що використовують для визначення щоденної фізичної активності людини. При цьому застосовується бездротова базова мультисенсорна інтегрована система вимірювання, яка використовує інерційний вимірювальний пристрій (IMU) із тривісним акселерометром у складі. Пристрій може бути розміщений на стегні людини для ідентифікації їзди на велосипеді, ходьбі, підйомі по сходах тощо, а також для вимірювання стану здоров'я людини – її серцебиття та руху ніг та рук людини [6].

У інших сферах застосування, таких як автомобільна галузь, тривісна система отримала величезне інтегроване застосування. Зокрема,

використання відстеження швидкості та положення автомобіля у поєднанні з іншими сенсорами MEMS.

Основними компаніями по виробництву інерційних сенсорів є компанії Analog Devices, STMicroelectronic, Freescale Semiconductor, Silicon Sensing Systems. Більшість акселерометрів містять в одному виконанні головний MEMS-пристрій та ASIC [5].

#### 1.4 Інерційні MEMS-сенсори у транспортних засобах

Інноваційні транспортні сенсори на мікрорівні представлені інтегральними MEMS-сенсорами – мікромеханічними, магнітокерованими та іншими мікросхемами, у вигляді спеціалізованих окремих ІС, мікромініатюрних датчиків і ASIC, розміщених на кристалі.

В автомобільній галузі використовуються сенсорні системи, які можна класифікувати за призначенням або типами пристроїв: датчики положення, температури, прискорення, тиску, індуктивні датчики, а також системи безпеки або контролю і управління двигуном. В мережевій концепції інтегральна схема або модуль може одночасно виконувати кілька сенсорних функцій, об'єднувати кілька сенсорних пристроїв і входити в кілька різних автомобільних систем. Інтеграція нанотехнологій і MEMS в макросистеми дозволяє виробляти і використовувати «розумні» матеріали, обладнання й системи нанорівня.

Сучасний автомобіль може включати не менше 100 датчиків та макропристроїв з друкованими платами і автомобільними з'єднувачами, що входять до складу автомобільних систем. Застосування акселерометрів сконцентровано в області безпеки, зокрема, виявлення аварії, активації систем безпеки виявлення і контролю – розгортання бічних подушок безпеки, динамічного тест-контролю автомобіля, інерціальних гальмівних вогнів, виявлення перекидання автомобіля, детектування крену, антиблокувальної системи коліс при гальмуванні, контролю нерівності дороги, сенсорного

кластера, що містить блок інерціальних вимірювань тощо. Інерціальна навігаційна система (IMU) розміщена, зазвичай, в центрі автомобіля для збору інформаційних сигналів з усіх інерційних систем.

Використання МЕМС-акселерометра у галузі відстеження транспортних засобів переважно призначене для визначення прискорення транспортного засобу. Отримане прискорення може бути обчислено математично з метою визначення швидкості і положення транспортного засобу. Для того, щоб мати можливість визначити прискорення транспортного засобу, існує механізм зчитування, який може бути ємнісним, п'єзоелектричним або п'єзорезистивним.

Вибір ємнісного акселерометра для відстеження транспортних засобів, зазвичай, ґрунтується на його перевагах, таких як: нульове статичне зміщення, висока чутливість і краща термічна стабільність. Означені переваги роблять ємнісний акселерометр найкращим вибором для застосунків із меншою потужністю [8].

Вимірювання положення транспортних засобів через систему GPS досягається за допомогою ІС трьохосового ємнісного акселерометра. Конструкція сенсора прискорень, що розроблена за технологією МЕМС, має рівномірну чутливість за трьома вісями та має скляно-кремнієве скло, виготовлене з маси, яка з'єднана з кремнієвою опорою, що підвішена на центральній основі за допомогою чотирьох тонких кремнієвих балок. Вимірювання ємності відбувається за допомогою з'єднання кремнієвих електродів на пластині пробної маси для здійснення рухів [8].

У МЕМС-акселерометрах з поверхневою мікрообробкою розроблено схеми зчитування для реєстрації прискорення транспортного засобу, враховуючи при цьому, що для визначення стану транспортного засобу необхідно знати важливі параметри швидкості і його положення. Таким чином, модель «положення-швидкість-прискорення» позиційно-швидкісного прискорювача (PVA) досліджується для здійснення перетворення прискорення транспортного засобу у швидкість і положення відповідно.

Швидкість може бути отримана за допомогою першого інтегрування прискорення, а положення (відстань) – за допомогою другого інтегрування.

Вимірне прискорення має відповідати відстані, яку проїхав транспортний засіб. Існує лінійна залежність між прискоренням та відстанню автомобіля. Для досягнення ефективного визначення місця розташування транспортного засобу об'єднують GPS і акселерометр, що має замкнутий контур. При аналізі та моделюванні акселерометра із замкнутим контуром використовується математичне моделювання за допомогою програмного забезпечення Matlab/Simulink.

На сьогоднішній день, інерційні MEMS-сенсори знайшли застосування у аварійних сенсорах для здійснення контролю подушок безпеки, а також при детектуванні фронтальних аварій. Акселерометр вимірює прискорення автомобіля безперервно. При перевищенні певної межі прискорення, для визначення наявності зміни швидкості об'єкта контролер, що містить система, обчислює інтеграл прискорення. Якщо присутня різка зміна швидкості, тоді буде запущена для розкриття подушка безпеки. Рішення про розкриття передніх подушок безпеки приймається упродовж десятках мілісекунд, а рішення щодо запуску розкриття бічних подушок приймається ще швидше. Отже, автомобільні двері відносно водія і пасажирів розташовуються ближче, ніж до керма або панелі з приладами.

Спрацювання подушок безпеки здійснюється приблизно за 30-50 мілісекунд і при цьому швидкість запуску подушки складає приблизно 322 км/год. Перевагою акселерометрів є здатність виконання самотестування.

На рисунку 1.7 зображено автомобіль з встановленою центральною системою з інерційним вимірювальним вузлом (рис.1.7). Дана система передає інформаційні сигнали, у тому числі, у блок, що керує подушками безпеки.

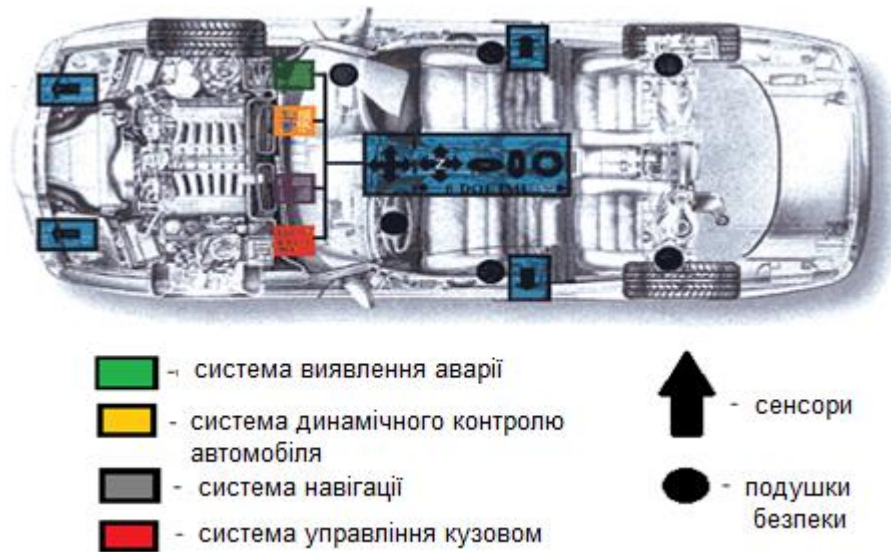


Рисунок 1.7 – Розташування центральної системи автомобіля з інерційним вимірювальним вузлом

Системи динамічного контролю, навігаційні системи, а також паркувальні системи використовують сигнали інерційного вимірювального вузла. По периметру автомобіля встановлюють автономні акселерометри для того, щоб розпізнавати дорожньо-транспортну подію. У даний час в транспортних засобах застосовується концепція кластера інерційних сенсорів, що призначені для передачі інформаційних сигналів у будь-яку систему автомобіля.

### 1.5 Мета та постановка завдання

Метою кваліфікаційної роботи є розробка моделей проектування МЕМС-акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулюванням та їх моделювання з використанням пакету Matlab/Simulink .

Об'єктом дослідження є МЕМС-акселерометри замкнутого контуру у транспортних засобах. Предметом дослідження є моделі мікромеханічних акселерометрів у Matlab/Simulink.

Для досягнення мети були визначені наступні задачі:

- аналіз сучасного стану мікросистемної техніки;
- аналіз механічної та електричної моделей емнісного MEMC-акселерометра;
- аналіз структур MEMC-акселерометрів замкнутого контуру з ПД-та ПД-регулюванням;
- аналіз блок-схеми акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулятором та похідним фільтром та передавальних функцій складових блок-схеми;
- розробка Simulink-моделі сенсорного компонента MEMC-акселерометра та її поведінкове моделювання;
- розробка Simulink-моделі MEMC-акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулюванням та моделювання в Matlab/Simulink;
- розробка Simulink-моделі акселерометра замкнутого контуру з похідним фільтром та моделювання в **Matlab/Simulink**.

## 2 СТРУКТУРИ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРІВ ЗАМКНУТОГО КОНТУРУ

У даному розділі розглянуто конструкцію та рівняння динаміки МЕМС-акселерометра, електричну модель ємнісного акселерометра. Розглянуто ПІ- та ПІД-регулювання в МЕМС-акселерометрах, проаналізовано структури МЕМС-акселерометрів замкнутого контуру та передавальні функції складових структури з ПІД-регулюванням.

### 2.1 Принцип дії та рівняння динаміки акселерометра

Акселерометри - це прилади, які вимірюють лінійне прискорення досліджуваного об'єкта. Акселерометри мають пробну масу, що підтримується балками, закріпленими з обох боків. У кваліфікаційній роботі було обрано конструкцію осевого мікромеханічного МЕМС-акселерометра із ємнісними сенсорами виміру переміщень інерційної маси (ІМ) чутливого елемента.

На рис. 2.1 зображені ємнісний МЕМС-акселерометр та мас-пружинна демпферна система. Мас-пружинна демпферна система складається з інерційної маси  $m$ , пружного елемента та демпфера.

ІМ, яка закріплена у пружному підвісі, є компонентом чутливого елемента акселерометра, що реагує на механічні коливання. Повітря всередині корпусу пристрою забезпечує механічне гасіння руху пробної маси. Отже, мас-пружина демпферна система (розімкнутий контур) може бути виражена за допомогою диференціального рівняння другого порядку, де величини  $m$  – інерційна маса, а коефіцієнти  $b$  і  $k$  - коефіцієнт демпфірування середовища всередині корпусу та пружність балок відповідно.

В системі акселерометра виникають коливання у площині, яка перпендикулярна до головної вісі, тобто під кутом  $90^\circ$ . Поперечна чутливість, що виникає при коливаннях ІМ, характеризує здатність сенсора

виконувати перетворення прискорення у електричний сигнал. Значення поперечної чутливості є відносною величиною, вираженою у % від значення чутливості у напрямку основної вісі. Отже, ІМ  $m$  переміщується уздовж прямої, яка є віссю акселерометра і рухається у даному напрямку з прискоренням  $a$ . На масу  $m$  діє сила інерції  $F_i$ , що є добутком маси та прискорення:  $F_i = m\ddot{x}$ , де  $x$  - відхилення інерційної маси  $m$  від рівноваги [8].

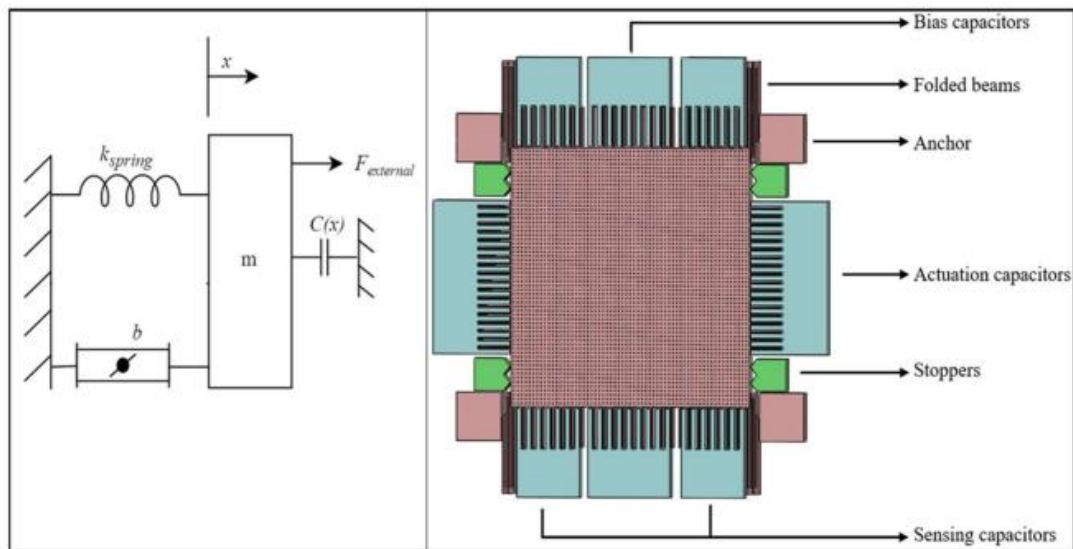


Рисунок 2.1 – Ємнісний MEMC-акселерометр та мас-пружинна демпферна система

Під дією сили інерції маса  $m$  починає здійснювати рух та деформує пружинний елемент  $k$  ( $k$  - коефіцієнт жорсткості пружного компонента): сила пружини  $F_s = kx$ , що протидіє руху ІМ. Відхилення маси  $m$  у корпусі сенсора від її початкового положення при наявності уявного прискорення є інформаційним сигналом про величину даного прискорення.

У розглянутій конструкції акселерометра демпфер гасить коливання маси  $m$ . Демпфер чинить опір руху маси  $m$  із силою демпфірування  $F_d = b \dot{x}$ , де  $b$  - коефіцієнт загасання внаслідок демпфірування. Сила демпфірування пропорційна швидкості руху маси  $m$ , та перетворює енергію

коливального руху у теплову енергію. Вихідний сигнал системи пропорційний прискоренню. Чим більше величина уявного прискорення, тим більше деформується пружина і внаслідок цього змінюються показники вимірювання пристрою. При русі ІМ з прискоренням до маси  $m$  прикладені фізичні сили: сила інерції, сила деформації пружини, сила тяжіння, що є уздовж вісі чутливості .

Переміщення пробної ІМ представлено за допомогою змінної переміщення  $x$ , а зовнішнє вхідне прискорення  $a$ . У МЕМС-акселерометрах, які працюють у режимі керування, виникає прискорення Коріоліса, що діє вздовж вимірювальної вісі.

Отже, фізичні сили, що діють у системі, описані виразом:

$$F_{\text{internal}} + F_{\text{damping}} + F_{\text{spring}} = F_{\text{external}}, \quad (2.1)$$

де  $F_{\text{external}}$  – зовнішня прикладена сила;

$F_{\text{damping}}$  – сила демпфірування;

$F_{\text{internal}}$  – сила інерції;

$F_{\text{spring}}$  – сила пружини.

Рівняння руху, тобто поступального переміщення ІМ, а отже, рівняння динаміки лінійного МЕМС-акселерометра є диференціальним та має вигляд:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = ma \quad (2.2)$$

При проведенні досліджень систем переходять до операторної форми із застосуванням оператора Лапласа ( $s$ ). При цьому компоненти системи, які складають її структуру, являють собою з'єднання ланок з певними передавальними функціями.

Отже, диференціальне рівняння динаміки акселерометра, виражене через оператор Лапласа, має вигляд:

$$m s^2 X(s) + b s X(s) + k X(s) = m A(s) \quad (2.3)$$

Передавальна функція механічної моделі МЕМС-акселерометра, отримана на основі (2.3), є лінеаризованою та має вигляд:

$$\frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (2.4)$$

При розгляді математичної моделі лінійного МЕМС-акселерометра розглядається фізичний процес у електричній складовій. Переходячи до електричної моделі акселерометра, розглянемо акселерометр ємнісного типу, який знаходить найпоширеніше використання у транспортних засобах.

У МЕМС-акселерометрах з двох сторін ІМ встановлені гребінчасті електроди. Вони рухаються разом з ІМ під дією зовнішнього прискорення. Конструкція акселерометра має набір електродів, які створюють конденсатори для виконання зчитування сигналів.

Якщо система МЕМС-акселерометра має прискорення, то ІМ і прикріплені до неї рухомі електроди рухаються вільно. Отже, рух ІМ змінює відстань між певними пластинами конденсатора і це призводить до зміни ємностей між електродами [9].

Основою ємнісного методу є принцип вимірювання переміщення ІМ, при прикладенні зовнішнього прискорення до ІМ сенсора. Якщо ІМ чутливого елемента відхиляється по напрямку вісі чутливості, то значення ємності між ІМ та нерухомими електродами змінюється та здійснюється вимірювання величини цієї ємності. Якщо подати електричний сигнал (напруга  $V$ ) на паралельні пластини акселерометра, то між даними пластинами буде згенерована електростатична сила, яка імітує зовнішню фізичну силу, що пов'язана з прискоренням ІМ.

Ємнісний МЕМС-акселерометр, до якого прикладена електростатична сила  $F$  схематично зображено на рис. 2.2, між електродами зображено ємності  $C_1$  і  $C_2$ , величина яких змінюється при дії сили  $F$ .

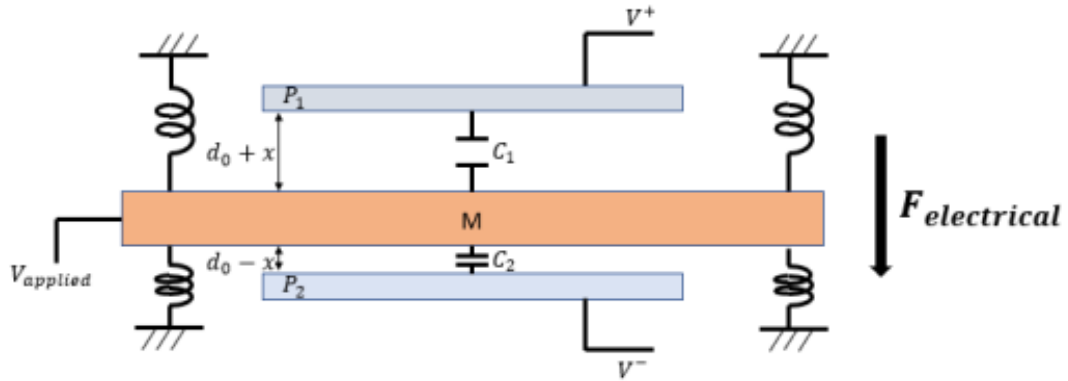


Рисунок 2.2 – Ємнісний МЕМС-акселерометр

Кожна фіксована обкладка конденсатора у ємнісному акселерометрі створює схему сенсора прискорення, при цьому пластини конденсатора - рухомі. У складі конденсатора є дві окремі обкладки, у яких є активні поверхні, розташовані на протилежних сторонах.

Для здійснення процесу вимірювання ємності у системі, на електроди двох конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$  прикладена напруга  $V$ , при цьому є можливість здійснити вимірювання двох електростатичних сил  $F_1$  та  $F_2$ , що діють на рухому  $M$ . У положенні спокою електростатичні сили є рівними і компенсують одна одну. Коли напруга  $V$  прикладається до електродів, ємності конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$  змінюються і стають різної величини. Внаслідок цього змінюються і електростатичні сили. Ємності конденсаторів є величинами, що необхідно знайти.

Електрична ємність визначається за формулою  $C = \epsilon \frac{S}{x}$ , де  $S$  – площа пластини електроду;  $\epsilon$  – діелектрична проникність матеріалу;  $x$  – відстань, що є між обкладками конденсатора.

При переміщенні ІМ на певну відстань  $x$  виникає зміна заряду обкладки конденсатору. Внаслідок цього виникає зміна напруги  $dV$  на обкладці, яка залежить лінійно від зміни відстані  $dx$  між обкладками конденсатору.

У ємнісному акселерометрі прикладені до електродів напруги  $V_1$  та  $V_2$  мають протилежні знаки, тобто  $V_1 = -V_2$ . Величина ємності змінюється і дорівнює  $C = \varepsilon \frac{S}{x - dx}$ , якщо змінюється відстань  $dx$  між обкладками. На рухомих обкладах конденсатору залежність напруги  $V$  від переміщення  $x$  є лінійною та має вигляд:  $V = V_1 \frac{dx}{x}$ .

З урахуванням викладеного вище, у ємнісній моделі акселерометра значення ємностей  $C_1$  і  $C_2$  визначаються за формулами:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d_0 + x}, \quad C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d_0 - x}, \quad (2.5)$$

де  $x$  – переміщення маси між обкладками;

$d_0$  – відстань між обкладками конденсатора (початковий стан);

$\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму.

На даний час до інерційних МЕМС-сенсорів збільшуються вимоги в сенсі таких характеристик, як роздільна здатність та термін служби пристроїв (акселерометрів, гіроскопів).

Розробку високоефективних інерційних сенсорів, що мають поширений динамічний діапазон та покращені механічні властивості, може бути здійснено за рахунок впровадження в інерційні сенсори замкнутого контуру. Завдяки перевагам цифрового керування, таким як спрощена вбудована електроніка та менше енергоспоживання, цифрові схеми керування із замкнутим контуром досліджуються широко.

## 2.2 ПІ- та ПІД-регулювання в МЕМС-акселерометрах замкнутого контуру

Система управління із замкнутим контуром характеризується способом автоматичного керування, при якому робота, процес або механізм саморегулюються за допомогою зворотного зв'язку.

Системи автоматичного управління (САУ) призначені для автоматичної зміни одного чи кількох параметрів об'єкта управління з метою встановлення необхідного режиму роботи. САУ забезпечує підтримання сталості заданих значень регульованих параметрів або їх зміну за заданим законом керування, або оптимізує певні критерії якості управління.

Для покращення технічних характеристик МЕМС-акселерометрів їх структури виконують із замкнутим контуром, в яких використовується ПІ- або ПІД-регулювання. Роль замкнутого контуру керування полягає у скасуванні руху, що викликаний зовнішнім прискоренням, з метою лінеаризації вимірювання та розширення динамічного діапазону чутливості. Крім того, для покращення продуктивності і чутливості МЕМС-акселерометрів, вони працюють на межі нестабільності, у так званому, режимі втягування. Втягування – це явище нестабільності системи, коли лінійному опору пружини, що створюється балками, переважає нелінійна електростатична сила. За допомогою керування негативним зворотним зв'язком пробна ІМ може бути стабілізована на критичній межі стабільності втягування для покращення чутливості акселерометра.

Загальну структуру системи з ПІ-регулюванням зображено на рис. 2.2. В системі ПІ-регулятор може бути використаний, коли потрібна висока швидкість відгуку сигналу. ПІ-регулятор є паралельним з'єднанням пропорційного та інтегрального регуляторів (рис.2.2).

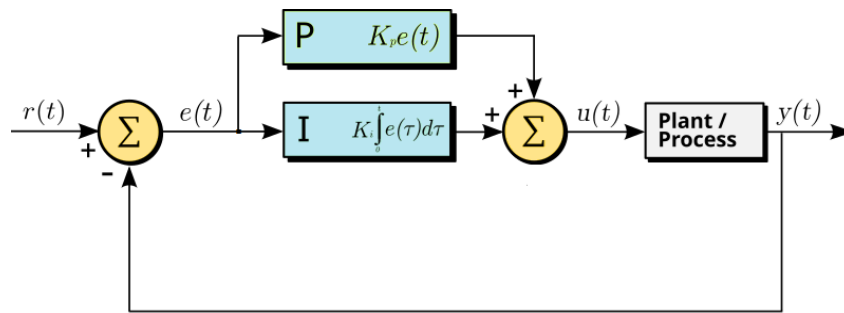


Рисунок 2.2 – Структура системи з ПІ-регулюванням

ПІ-регулятор використовує пропорційне та інтегральне управління.

Пропорційне управління P: в системі компонент пропорційного керування реагує на похибку між заданим значенням і фактичною змінною процесу. Пропорційний П-регулятор регулює контрольний вихід на основі різниці між бажаним і вимірним значеннями сигналу, а отже, вихідний сигнал регулятора створює протидію відхиленню регульованої величини (помилки неузгодження) від заданого значення. Чим більше помилка неузгодженості, тим більше буде відхилення сигналу регулятора і пропорційне посилення визначає силу даного відгуку. П-регулятор видає сигнал виходу, що є пропорційним поточній помилці:  $u(t) = k * e(t)$ . За допомогою елемента порівняння здійснюється порівняння сигналу заданої точки із фактичним значенням або із значенням певного процесу зворотного зв'язку. Коли значення помилки «0», то сигнал виходу П-регулятора є нульовим.

Пропорційне керування має недолік: П-регулятор не забезпечує стабільність сигналу заданого значення. При збільшенні коефіцієнта пропорційності у системі можуть виникати автоколивання. У зв'язку з цим потрібно до пропорційного закону керування застосувати інтегральний.

Інтегральне управління I: інтегральний компонент управління коригує будь-яку стабільну помилку, яка може зберігатися в системі. Сигнал результату подається зворотно на контрольний вихід. Інтегральний параметр посилення визначає силу даного відгуку. І-регулятор безперервно підсумовує

помилку регулювання у часі, що дозволяє регулятору усувати статичну залишкову помилку. Отже, інтегральна ланка завжди вносить деяке зміщення і, якщо система схильна до певних константних помилок, то вона їх компенсує. Якщо такі помилки є малими, то буде мати місце зворотний ефект, за рахунок якого інтегральна складова буде сама вносити помилку зміщення.

I-регулятор виробляє необхідні дії для забезпечення відсутності помилки сталого режиму системи та інтегрує помилку впродовж періоду часу, поки значення помилки стане рівним «0». Інтегральне управління зменшує вихідний сигнал системи у тому разі, коли в системі помилка є від'ємною. I-регулятор впливає на стабільність системи у цілому, здійснює обмеження швидкості реакції системи. При зменшенні коефіцієнта інтегрального посилення  $k_i$  швидкість реакції системи зростає.

Так як П та I-регулятори з'єднані паралельно, сигнал управління у системі є сумою двох складових – пропорційної та інтегральної та має

вигляд: 
$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$
. При зменшенні коефіцієнта посилення I-регулятора  $k_i$ , помилка встановленого режиму також продовжує зменшуватися. I-регулятор не може передбачити поведінку сигналу помилки у майбутньому.

При використанні П-регулятора вихідний сигнал I-регулятора обмежений певним діапазоном для того, щоб подолати інтегральні умови, коли інтегральний вихід сигналу зростає навіть при значенні помилки, яка приблизно дорівнює «0» через нелінійність у системі. З метою кращого налаштування та статистичного тестування для визначення лінійних перевірочних характеристик ємнісного акселерометра замкнутого контуру моделюють систему з ПД-регулятором.

Ємнісний акселерометр – це сенсор, який використовує динамічну модель закону фізики позиційно-швидкісного прискорювача за допомогою руху електрода, для перевірки маси між паралельними пластинами, а отже,

для виявлення переміщення транспортного засобу/об'єкта. Моделювання замкнутої системи допомагає пом'якшити стаціонарне накопичення похибок вимірювань у моделі акселерометра з відкритим контуром. Акселерометр дає лінійну часову залежність вихідного переміщення після подачі на вхід системи ступінчастої функції прискорення. Модель із замкнутим контуром може передбачити бажаний вихідний сигнал. Лінійність моделі перевіряється статистично за допомогою простої регресії набору даних, яка вказує на те, що у будь-який час прискорення передбачає переміщення/положення автомобіля/об'єкта [10].

На рис. 2.3 зображено Simulink-модель акселерометра замкнутого контуру, який містить ПІ-регулятор. За допомогою моделі може бути здійснено моделювання характеристик акселерометра для визначення лінійної залежності між прискоренням і положенням. Перевірка моделі на статистичну значущість здійснюється за допомогою регресійної моделі. Модель базується на математичному моделюванні за допомогою Matlab/Simulink.

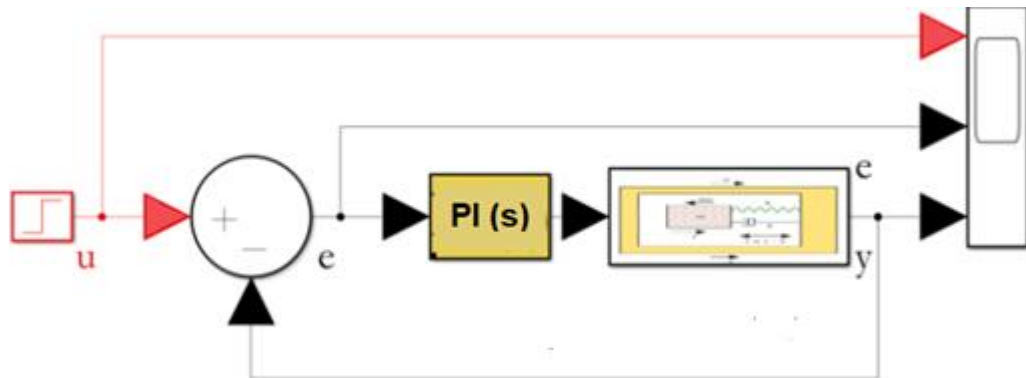


Рисунок 2.3 – Simulink-модель акселерометра замкнутого контуру з ПІ-регулятором

Система використовує пропорційно-інтегральний (ПІ-регулятор) для встановлення стабільності підсилення розімкнутого контуру акселерометра.

Коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора представлено передавальною

функцією:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.6)$$

При моделюванні та імітації ємнісного акселерометра замкнутого контуру з ПІ-регулятором використовується модель, яка імітує прискорення позиційної швидкості «прискорення-швидкість-переміщення».

Модель складається з механічного блоку, блоку виявлення заряду та демодулятора сигналу із блоком фільтра низьких частот. При дослідженні моделювання у системі акселерометра з відкритим контуром в результаті подачі на вхід системи сигналу прискорення вихідний сигнал показує перевищення амплітуди сигналу. Однак, при використанні керування акселерометра замкнутого контуру з ПІ-регулюванням, досягається бажаний результат.

Розглянемо МЕМС-акселерометр з пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором (ПІД-регулятором), який знаходить широке використання в системах акселерометрів замкнутого контуру [10]. В загальному вигляді ПІД-регулятор складається з трьох регуляторів, а отже, П-, І- та Д-регулятора, які з'єднані паралельно. ПІД-регулятор створює сигнал керування, що є сумою трьох доданків: пропорційного, інтегрального і диференціального (рис.2.4).

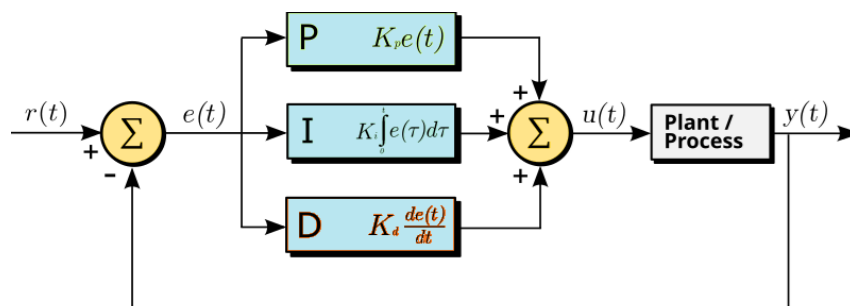


Рисунок 2.4 – Структура ПІД-регулятора

В структурі регулятора є негативний зворотний зв'язок, який забезпечує вихідний сигнал управління бажаного рівня.

Пропорційне та інтегральне регулювання розглянуто вище. У структурі П-регулятор підсилює сигнал виходу, що є пропорційним поточній помилці та реагує на похибку між бажаним заданим значенням і фактичною змінною процесу. І-регулятор коригує будь-яку стабільну помилку, яка може зберігатися в системі. І-регулятор неперервно підсумовує помилку регулювання в часі.

Треба зауважити, що недоліком інтегрального керування є наявність ефекту насичення інтегратора. При здійсненні регулювання у системі сигнал управління робить певні коливання близько пошукового заданого значення. З метою вирішення цієї проблеми в систему додають диференціальний компонент, який пригнічує інтегральне керування при значних коливаннях сигналу помилки.

Диференціальне (похідне) управління D: компонент похідного керування передбачає майбутню помилку шляхом вимірювання швидкості зміни змінної процесу, а отже, диференціальна складова пропорційна швидкості зміни відхилення регульованої величини і призначена для протидії відхиленню від значення, що прогнозується у майбутньому.

Диференціальна ланка усуває загасаючі коливання. Диференціальне регулювання особливо ефективно для інерційних процесів, тобто які мають значні запізнення.

Недолік диференціального управління – нестійкість до впливу шумів. Вихідний сигнал D-регулятора залежить від швидкості зміни сигналу похибки упродовж часу, помножений на постійну похідну, в результаті збільшується системний відгук сигналу.

Пропорційні, інтегральні і диференціальні ланки, які з'єднані паралельно, створюють контур зворотного зв'язку. Даний контур безперервно регулює сигнал контрольованого виходу на основі заданого значення і змінної процесу, що вимірюється.

ПД-регулятор підтримує вихідний сигнал таким чином, щоб між змінною процесу і бажаним значенням вихідного сигналу була помилка, що дорівнює «0». При цьому наявність зворотного зв'язку забезпечує регулювання вихідного сигналу управління, у результаті чого система управління може підтримувати стабільну змінну процесу при відсутності сигналу помилки. Для оптимізації системи параметри контуру ПД-регулювання - пропорційне посилення, час інтегрування і час похідної мають бути налаштовані.

В системі управління з ПД-регулюванням керуючий сигнал є сумою трьох складових:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

У системі з ПД-регулятором час встановлення сигналу виходу є малим, що означає покращення характеристик стабільності даної системи внаслідок компенсації фазового запізнювання сигналу, що виникає в результаті використання І-регулятора.

Перед початком роботи системи ПД-регулятор має бути налаштований на динаміку процесу, який контролюється, і для забезпечення ефективності розробленої системи значення параметрів П, І, Д регуляторів повинні бути налаштовані.

Є декілька методів для налаштування ПД-регуляторів, що можуть забезпечити вибір кращих значень коефіцієнтів пропорційних, інтегральних та диференціальних його компонентів. Існує метод проб і помилок. При даному способі налаштування ПД-регулятора поперше необхідно встановити значення коефіцієнтів пропорційного та диференційного регуляторів  $k_p$  і  $k_d$  у нульове значення і збільшити пропорційний коефіцієнт  $k_p$  до значення, поки система не досягне коливального процесу. Подруге, як тільки система приходить у коливання, потрібно відрегулювати інтегральний коефіцієнт  $k_i$  для того, щоб коливання згасли і, надалі, потрібно налаштувати Д-регулятор, щоб отримати швидкий відгук.

Крива технологічного процесу – метод налаштування із відкритим

циклом, що генерує відгук. Потрібно вручну вводити певні дані управління у систему та отримувати криву відгуку. На наступному етапі потрібно розрахувати початковий час, а також час зростання кривої  $i$ , нарешті, підставити ці значення в рівняння складових  $P$ ,  $I$  і  $D$ , щоб отримати значення коефіцієнтів підсилення ПД-регулювання.

Використання акселерометра у транспортному засобі залежить від високої частоти близько 100 МГц, яку необхідно контролювати для належної оцінки переміщення  $x$ . У роботі розглядається система акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулятором.

ПД-регулювання допомагає акселерометру досягти кращої стабільності сигналу відгуку з часом для того, щоб система мала змогу відстежувати транспортний засіб з необхідною точністю позиціонування перед тим, як поєднувати систему з похідним фільтром Калмана.

Для створення системи зворотного зв'язку, необхідно вибрати сенсор, що має забезпечувати вихідну напругу, пропорційну динамічній моделі. Тому при виборі сигналу зворотного зв'язку необхідна балансуєча врівноважувальна електростатична сила для того, щоб перевірити силу інерції акселерометра. У сенсорному елементі встановлюється зчитування малого переміщення від пробної ІМ між двома закріпленими електродами на паралельних пластинах.

Таким чином, певні сили прямого та зворотного зв'язку будуть електростатичними силами, що мають обидві полярності - позитивну і негативну. Крім того, електростатичні сили використовуються для відновлення сили, яка врівноважує силу прискорення.

На рис. 2.5 приведено Simulink-модель акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулятором, що забезпечує процес контролю при стратегії управління, зокрема, керує змінними процесу, такими як швидкість, прискорення.

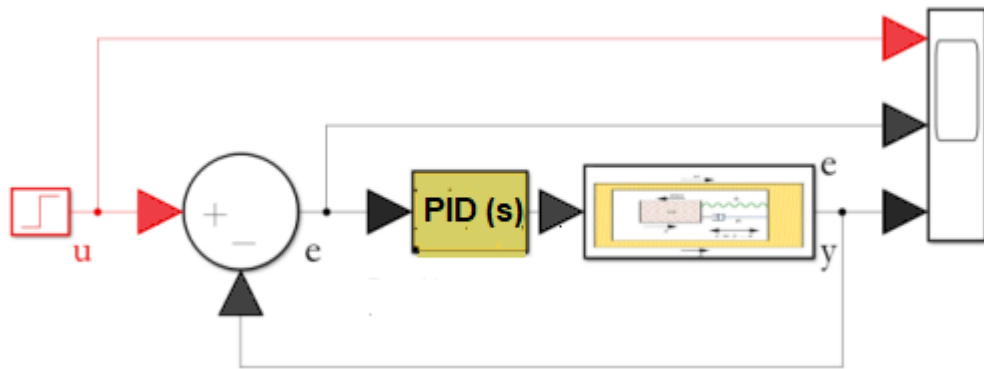


Рисунок 2.5 – Simulink-модель акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулятором

Коефіцієнт підсилення ПД-регулятора, а отже, передавальна функція має вигляд:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

$$G_c(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (2.7)$$

Таким чином для того, щоб об'єднати GPS і акселерометр з метою досягнення ефективного визначення місця розташування транспортного засобу, у роботі використовується механізм замкнутого контуру та математичне моделювання за допомогою програмного забезпечення Matlab/Simulink.

### 2.3 Корекція системи управління MEMS-акселерометра замкнутого контуру з використанням похідного фільтра

При розгляді систем керування MEMS-акселерометрів із замкнутим контуром з точки зору передачі сигналів та їх перетворення виникає питання забезпечення точності передачі сигналів.

В системі має бути забезпечена точність відтворення заданого закону керування  $x_{\text{вих}}(t) = x_{\text{вх}}(t)$ . Похибка системи за дією, що задана, визначається, як  $\Delta x(t) = x_{\text{вх}}(t) - x_{\text{всх}}(t)$ . Зважаючи на наявність в системах управління перехідних процесів, точність автоматичних систем управління оцінюють за величиною сталої похибки (похибки у стаціонарному режимі), яка має місце у стійкій системі управління після завершення перехідного процесу. Стала похибка (статична) пропорційна величині заданої дії керування та зменшується зі збільшенням коефіцієнта передачі розімкненої системи. При діях, що змінюються у часі, похибка безперервно зростає і погіршує стійкість системи. З метою покращення перехідного процесу, зменшення похибки керування та збереження стійкості системи, а також компенсації запізнення сигналу в частотній області необхідно включити у схему послідовно похідний фільтр низьких частот (ФНЧ), який використовується в якості диференціуючого фазопереджуючого пристрою.

Поверхневі мікромеханічні ємнісні МЕМС-акселерометри, які мають вбудовану схему зчитування CMOS, зазвичай мають шум понад 0,02 сили тяжіння  $g$ . Керування зворотним зв'язком із примусовим балансуванням, яке використовується в МЕМС-акселерометрах, покращує характеристики акселерометрів, такі як підвищення їх стабільності, пропускну здатності та динамічного діапазону. Однак, регулятор в системі також підвищує рівень шуму. У МЕМС-акселерометрі є два основних джерела шуму: електронний шум від схеми зчитування CMOS і термомеханічний броунівський шум, викликаний затуханням. Фільтр низьких частот Калмана, так званий, похідний фільтр, є ефективним рішенням проблеми зменшення впливу шумів шляхом оцінки та скасування станів, забруднених шумом. Похідний фільтр, що може бути включений у структуру МЕМС-акселерометра замкнутого контуру, використовується з метою фільтрації шуму, зберігаючи його задовільні характеристики. У порівнянні з методом керування МЕМС-акселерометрів з відкритим контуром, керування із замкнутим контуром в акселерометрах більш надійне проти шуму та зовнішніх перешкод.

Керування із замкнутим контуром із примусовим балансуванням застосовано в МЕМС-акселерометрах серії ADXL від Analog Devices.

Розробка і дослідження МЕМС-акселерометрів замкнутого контуру показали, що для зменшення шуму у мікромеханічному МЕМС-акселерометрі, зберігаючи при цьому його високу продуктивність сприйняття завдяки замкнутій системі керування, використовують похідний ФНЧ в якості спостерігача для оцінки станів акселерометра з використанням вимірних вихідних даних. При цьому в системі акселерометра на вході використовують оцінені стани, які мають набагато нижчий рівень шуму при впливі на замкнуту систему. Даний метод не тільки дає розрахунковий вихідний сигнал практично з відсутністю шуму, але також покращує ефективність керування завдяки безшумному сигналу зворотного зв'язку. Використовуючи похідний фільтр Калмана, може бути покращена продуктивність МЕМС-акселерометра. Даний фільтр можна додати в мікроконтролер або мікросхему DSP, які використовуються в МЕМС-акселерометрах.

#### 2.4 Модель акселерометра з відкритим контуром

На рис.2.6 зображено блок-схему акселерометра з відкритим контуром, яка має блоки різних вузлів акселерометра: в схемі є механічний блок, схема електронного зчитування, яка складається з блоку детектування та блоку демодуляції з похідним ФНЧ. Позначення на рисунку:  $G_{ME}(s)$  – підсилення механічної та електричної моделі акселерометра,  $G_{AD}(s)$  – підсилення детектування акселерометра,  $G_{ADeL}(s)$  – підсилення демодуляції та ФНЧ ( $G_{ФНЧ}(s)$  - підсилення ФНЧ з електронним зчитуванням),  $G_{AOL}(s)$  – підсилення сигналу акселерометра з відкритим контуром,  $V_f(s)$  – сигнал виходу.

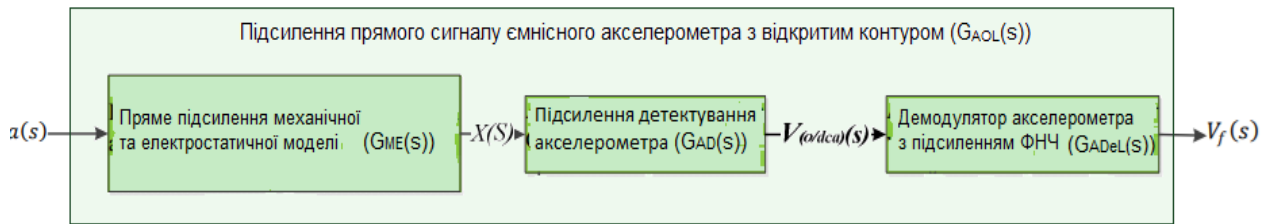


Рисунок 2.6 – Блок-схема акселерометра відкритого контуру з демодулятором та ФНЧ

Блок детектування акселерометра – це блок, який виявляє електронним способом переміщення пробної ІМ між паралельними пластинами. Даний блок виробляє підсилення  $G_{AD}(s)$ , яке отримано за принципом вимірювання ємності електростатичної сили. При цьому здійснюється перетворення механічного переміщення  $x$  в електронне вимірювання через зміни ємності [11]. Блок детектування прискорення має конденсатор з напругою, прикладеною до обох сторін пластин. Вимірювання переміщення отримують шляхом підвішування металевого електрода між електродами конденсатора. Підсилення  $G_{AD}(s)$  складається з електростатичної сили паралельної пластини та операційного підсилювача. Операційний підсилювач допомагає підсилити електричний сигнал, що детектується внаслідок механічного переміщення.

Механічний модуль акселерометра, який складається з інерційної маси, демпфера та пружини, описано рівняннями, що мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 m \frac{d^2x}{dt^2} &= kx + b \frac{dx}{dt} + m \frac{dx^2}{dt^2} \\
 b &= \frac{1}{2} \mu A^2 \left[ \frac{1}{(d_0 - dx)^3} + \frac{1}{(d_0 + dx)^3} \right] \\
 \frac{d^2y}{dt^2} &= \frac{d^2y}{dt^2} - \left[ \frac{k}{m} x + \frac{1}{2} \mu A^2 \left[ \frac{1}{(d_0 - x)^3} + \frac{1}{(d_0 + x)^3} \right] \cdot \frac{dx}{dt} \right] + \frac{\epsilon_0 AV_1^2}{4m} \cdot x \\
 a &= \frac{d^2y}{dt^2} \\
 a &= \frac{d^2x}{dt^2} + \left[ \frac{\mu A^2}{d_0^3} \cdot \frac{dx}{dt} \right] + x \cdot \left[ \frac{k}{m} - \frac{\epsilon_0 AV_1^2}{4m} \right]
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

де  $b$  - коефіцієнт демпфірування, обумовлений пружинним переміщенням;

$\mu$  - переміщення повітряного зазору внаслідок руху автомобіля;

$A$  - площа рухомої пластини;

$d_0, d_x$  - відстань переміщення електродів між паралельними пластинами.

Застосувавши перетворення Лапласа до (2.8), можна перейти до операторної форми і визначити передавальну функцію механічного модуля:

$$s^2 \cdot X(s) + \left[ \frac{\mu A^2}{d_0^3} \cdot s \right] \cdot X(s) + X(s) \cdot \left[ k - \frac{\epsilon_0 A V_1^2}{d_0^2} \right] = a(s) \cdot m$$

$$G_{ME}(s) = \frac{X(s)}{a(s)} = \frac{1}{\left( s^2 + \left[ \frac{\mu A^2}{m \cdot d_0^3} \cdot s \right] + \left[ \frac{k}{m} - \frac{\epsilon_0 A V_1^2}{m \cdot d_0^2} \right] \right)} \quad (2.9)$$

Сигнал,  $V_{(o/dca)}$ , отриманий на виході блоку детектування, фільтрується за допомогою ФНЧ у блоці демодулятора блок-схеми акселерометра і трансформується у вихідний сигнал  $V_f(s)$ .

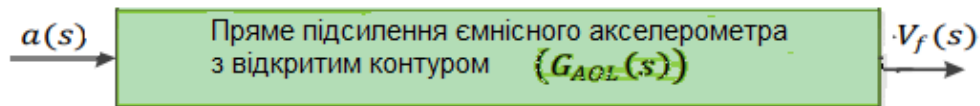


Рисунок 2.7 – Блок-схема підсилення акселерометра з відкритим контуром ( $G_{AOL}(s)$ )

Узагальнене підсилення  $G_{AOL}(s)$  представлено каскадом з трьох складових ( $G_{ME}(s)$ ), ( $G_{AD}(s)$ ) і  $G_{ADeL}(s)$  та має вигляд:

$$G_{AOL}(s) = (G_{ME}(s)) * (G_{AD}(s)) * (G_{ADeL}(s)) \quad (2.10)$$

Передавальна функція блоку відкритого контуру має вигляд:

$$G_{AOOL}(s) = \frac{V_F(s)}{a(s)} ; V_f(s) = G_{AOOL}(s)a(s) \quad (2.11)$$

В результаті перетворень було отримано рівняння, що представляє загальну модель акселерометра з відкритим контуром, враховуючи механічну модель переміщення ІМ та модель схеми зчитування (демодулятор):

$$V_F(s) = \frac{4V_1}{\pi} \left[ \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{C_4 d_0^2} * X \right] * \left[ \left( G_{inv.}(s) * G_{opAmp2}(s) \right) * (R_9 + R_{10}) \right], \quad (2.12)$$

де  $G_{inv}(s)$  - підсилення інвертора електронного зчитування;

$G_{opAmp2}(s)$  – підсилення операційного підсилювача блоку електронного зчитування.

Остаточна модель ємнісного акселерометра відкритого контуру  $V_f(s)$  представлена у функціональній блок-схемі на рис. 2.8.

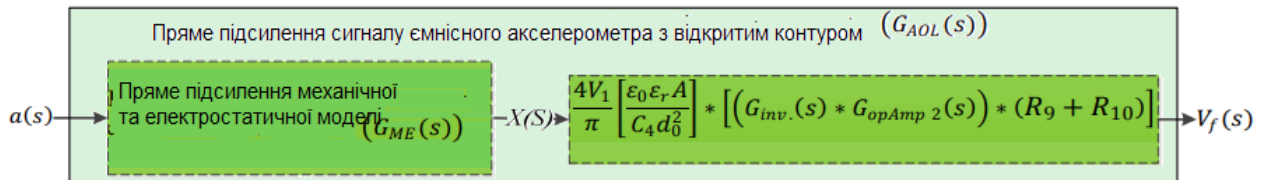


Рисунок 2.8 – Функціональна блок-схема моделі ємнісного акселерометра відкритого контуру

В результаті передавальна функція відкритого контуру має вигляд:

$$G_{AOOL}(s) = \frac{G_{ocf}}{\left( s^2 + \left[ \frac{\mu A^2}{m \cdot d_0^3} \cdot s \right] + \left[ \frac{k}{m} - \frac{\epsilon_0 A V_1^2}{m \cdot d_0^2} \right] \right)} \quad (2.13)$$

$$G_{AOOL}(s) = \frac{7.436e10}{s^2 + 316.1 s + 1.016e04}$$

У наступному підрозділі розглядається модель ємнісного акселерометра замкнутого контуру, розробленого із використанням пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулювання.

## 2.5 Модель акселерометра із замкнутим контуром

Система із замкнутим контуром – це, спосіб автоматичного керування системою, у якому робота, процес або механізм саморегулюються за допомогою зворотного зв'язку. У даному підрозділі розглядається блок-схема контуру зворотного зв'язку з використанням ПІД-регулятора та математичний опис системи акселерометра із замкнутим контуром.

Розробка контуру зворотного зв'язку для ємнісного акселерометра.

Необхідність у контурі зворотного зв'язку обумовлена метою усунення коливального характеру переміщення  $x$ , що викликає нестабільність в процесі вимірювання характеристик акселерометра. Тому виникає потреба у контролі вихідного сигналу.

Використання акселерометра у транспортному засобі залежить від високої частоти, близько  $100 \cdot 10^3$  Hz, яку необхідно контролювати для належної оцінки сигналу відгуку системи. Здійснення контролю сигналу відгуку розглядає використання ПІД-регулятора, який допомагає акселерометру досягти кращої стабільності сигналу з часом для допомоги системі відстежити транспортний засіб з точністю позиціонування перед тим, як поєднувати систему з похідним фільтром Калмана.

Модель зворотного зв'язку базується на типі сенсора, який забезпечує пропорційний сигнал динамічної моделі (механічний рух), тобто вихідну напругу, яка пропорційна динамічній моделі. Тому при виборі сигналу зворотного зв'язку необхідна врівноважувальна (балансуюча) електростатична сила для перевірки сил інерції механічного блоку акселерометра. У сенсорі здійснюється зчитування невеликого переміщення пробної ІМ між двома нерухомими електродами в паралельних пластинах.

Врівноважувальна електростатична сила використовується для врівноваження сили прискорення. Таким чином, будь-яка сила прямого зв'язку та зворотного зв'язку є електростатичними силами, що мають обидві полярності, як позитивну, так і негативну. Крім того, електростатичні сили використовуються для відновлення сили ЧЕ пробної маси для того, щоб врівноважити силу прискорення. Блок-схема акселерометра замкнутого контуру з демодулятором та похідним ФНЧ приведена на рис. 2.9.

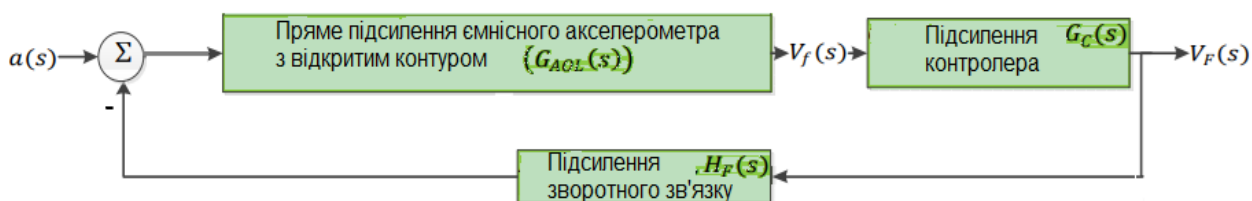


Рисунок 2.9 – Блок-схема акселерометра замкнутого контуру

Необхідність у контурі зворотного зв'язку для ємнісного акселерометра полягає у необхідності усунення коливального характеру переміщення  $x$ , що робить вимірювання параметрів акселерометра нестабільними. Тому виникає потреба в контролі вихідного сигналу системи  $V_F(s)$ .

Для встановлення сигналу електростатичної сили зворотного зв'язку, сигнал живлення зсуву (зміщення)  $V_b$  подається разом із сигналом збудження  $V_1$  для того, щоб отримати сигнал зворотного зв'язку в підсистемі двох електродів. В результаті система генерує переміщення  $V_{ne}$  і  $V_{pe}$  як джерела негативного електрода та позитивного електрода відповідно:

$$\left. \begin{aligned} V_{ne} &= v_1 - V_b + V_F \\ V_{pe} &= v_2 + V_b + V_F \end{aligned} \right\} , \quad \left. \begin{aligned} v_1 &= V_1 \sin \omega t \\ v_2 &= -V_1 \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Сигнал результату  $V_{npe}$  має вигляд:

$$V_{npe} = V_{ne} - V_{pe} \quad (2.15)$$

При застосуванні електростатичного зворотного зв'язку приведено рівняння, що описує електростатичну силу з урахуванням відстаней переміщення електродів між паралельними пластинами:

$$\left. \begin{aligned} F_{elF} &= F_{elne} + F_{elpe} \end{aligned} \right\} F_{elF} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{4} \cdot \left[ \frac{V_{ne}^2}{(d_0 - d_x)^2} - \frac{V_{pe}^2}{(d_0 + d_x)^2} \right] \quad (2.16)$$

$$F_{elF} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{4} \cdot \left[ \frac{(V_1 \sin \omega t - V_b + V_F)^2}{(d_0 - d_x)^2} - \frac{(-V_1 \sin \omega t + V_b + V_F)^2}{(d_0 + d_x)^2} \right]$$

З урахуванням того, що акселерометр має високу системну частоту та враховує початкове положення пробної ІМ  $x=0$ , сигнал зворотного зв'язку за електростатичною силою математично може бути описаний формулою:

$$F_{elF} = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0^3} \left[ x \left( \frac{V_1^2}{2} + V_b^2 + V_F^2 \right) - V_b V_F d_0 \right] \quad (2.17)$$

В результаті електростатична сила зворотного зв'язку має вигляд:

$$F_{elF} = - \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r A V_b V_F}{d_0^2} \quad (2.18)$$

Рівняння для всіх сил, що діють на пробну ІМ у сенсорі зі зворотним зв'язком мають вигляд:

$$\begin{aligned} \vec{F}_i &= \vec{F}_e + \vec{F}_a + \vec{a}_x - F_{elF} \\ ma &= kx + \frac{1}{2} \mu A^2 \left[ \frac{1}{d_0^3} + \frac{1}{d_0^3} \right] \frac{dx}{dt} + m \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r A V_b V_F}{d_0^2} \\ ma &= kx + \left[ \frac{\mu A^2}{d_0^3} \right] \frac{dx}{dt} + m \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r A V_b V_F}{d_0^2} \\ a &= \frac{k}{m} x + \frac{1}{m} \left[ \frac{\mu A^2}{d_0^3} \right] \frac{dx}{dt} + \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{m} \cdot \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r A V_b V_F}{d_0^2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Вихідний сигнал моделі прямого зв'язку, включаючи регулятор, має вигляд:

$$V_F(s) = V_f(s) * G_C(s) \Rightarrow V_F(s) = (G_{AOL}(s)) * (G_C(s)) \quad (2.20)$$

Тоді передавальна функція акселерометра замкнутого контуру приймає вигляд:

$$G_{ACL}(s) = \frac{V_F(s)}{a(s)} = \frac{(G_{AOL}(s)) * (G_C(s))}{1 + (G_{AOL}(s)) * (G_C(s)) * (H_F(s))} \quad (2.21)$$

В результаті, після перетворень передавальна функція акселерометра замкнутого контуру набуває вигляду [11]:

$$G_{ACL}(s) = \frac{(7.436e10) * (G_C(s))}{[s^2 + 316.1 s + 1.016e0 4] + (7.436e10) * (G_C(s)) * (H_F(s))} \quad (2.22)$$

Регулятор  $G_C(s)$ , який є пропорційно-інтегрально-диференціальною ланкою (PID), призначений для керування заданим вихідним сигналом акселерометра. Для керування моделлю акселерометра використовується паралельна модель ПІД-регулятора. Передавальна функція регулятора описується формулою (2.7).

При заміні передавальної функції ПІД-регулятора в (2.7) функцією передачі замкнутого контуру акселерометра (2.22) передавальна функція акселерометра замкнутого контуру визначається, як:

$$G_{ACL}(s) = \left. \begin{aligned} & \frac{(G_{ocf}) * \left( \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \right)}{[s^2 + 316.1 s + 1.016e0 4] + (G_{ocf}) * \left( \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \right) * (H_F(s))} \\ & \frac{(G_{ocf}) * (K_d s^2 + K_p s + K_i)}{[s^2 + 316.1 s + 1.016e0 4] s + (G_{ocf}) * (K_d s^2 + K_p s + K_i) * (H_F(s))} \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Характеристики кореня мають третій порядок, три полюси є коренями характеристичного полінома знаменника. Якщо три полюси лежать у лівій частині комплексної площини  $s$ , то полюси вважаються стабільними, а отже, система є стабільною та стійкою. З іншого боку для встановлення кращого зв'язку зі стабільністю всіх характеристик кореня, полюси вважаються критично демпфованими і мають бути  $-1, -1, -1$ .

Для знаходження полюсів знаменник передавальної функції (2.23) треба прирівняти до «0», в результаті отримано характеристичне рівняння:

$$s^3 + (316.1s^2 + K_d G_{ocf} H_F(s))s^2 + (1.016e04 + K_p G_{ocf} H_F(s))s + (K_i G_{ocf} H_F(s)) = 0 \quad (2.24)$$

Умовою стабільності системи є формула:

$$(s+1)^3 = s^3 + 3s^2 + 3s + 1. \quad (2.25)$$

На основі (2.24), (2.25) отримано формули коефіцієнтів ПД-регулятора:

$$\left. \begin{aligned} K_d &= \frac{(3-316.1)}{G_{ocf} H_F(s)} \\ K_p &= \frac{(3-1.016e04)}{G_{ocf} H_F(s)} \\ K_i &= \frac{1}{G_{ocf} H_F(s)} \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

З (2.18) і (2.19) отримано рішення для підсилення зворотного зв'язку  $H_F(s)$  – це величина, що пропорційна сигналу виходу системи акселерометра, яка є електростатичною силою та має вигляд:

$$F_{elF} = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r A V_b V_F}{d_0^2} \quad (2.27)$$

Коефіцієнти ПД-регулятора (2.26) отримано за умови, що початкове переміщення дорівнює нулю.

Напряга зворотного зв'язку  $V_b$  дорівнює напрузі на виході системи  $V_F(s)$ . При цьому:

$$a = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_rAV_b^2}{md_0^2} \equiv V_b = \sqrt{\frac{md_0^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_rA}} \equiv H_F(s) = 1. \quad (2.28)$$

При створенні Simulink-моделі акселерометра було налаштовано ПД-регулятор і враховано, що вихідний сигнал блоку ПД-регулятора є зваженою сумою вхідного сигналу, інтеграла вхідного сигналу та похідної вхідного сигналу. Ваговими коефіцієнтами є пропорційні, інтегральні та похідні параметри підсилення. Поліус першого порядку передавальної функції фільтрує похідну дію. Вхід блоку ПД-регулятора є сигналом помилки, який є різницею між опорним сигналом і системним виходом.

Паралельний ПД-регулятор в безперервному часі із похідним ФНЧ, що використовується в системі акселерометра, має передавальну функцію:

$$\left. \begin{aligned} G_c(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d * \frac{Ns}{1 + \frac{N}{s}} \\ G_c(s) &= \frac{(K_p + NK_d)s^2 + (NK_p + K_i) + K_iN}{s(s + N)} \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

У (2.30) параметр  $N$  – це параметр, що визначає ступінь фільтрації похідного коїпонента в структурі ПД-регулятора. Ця величина зворотня до логарифмічного декременту затухання і визначає кількість коливань, за час яких амплітуда сигналу зменшується в  $e$  раз. У таблиці 2.1 приведено значення розрахованих коефіцієнтів пропорційного, інтегрального, диференціального компонентів ПД-регулятора (по 2.26) та використаний

коефіцієнт затухання похідного фільтра для налаштування ПІД-регулятора на основі результатів, наведених у [11].

Таблиця 2.1 – Розраховані коефіцієнти підсилення ПІД-регулятора

Коефіцієнт П-регулятора	Коефіцієнт І-регулятора	Коефіцієнт Д- регулятора	Коефіцієнт затухання похідного ФНЧ
$k_p=0,00225$	$k_i=0.122$	$k_d=0,0000046$	$N=7180$

Перевагою моделі ПІД-регулятора в середовищі Simulink є можливість ручного або автоматичного налаштування. Однак, слід зазначити, що реалізація моделі залежить від того, наскільки добре розроблена та лінеаризована модель виробу ємнісного акселерометра.

### 3 МОДЕЛЮВАННЯ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА ЗАМКНУТОГО КОНТУРУ

У розділі розглянуто особливості проектування та моделювання МЕМС-пристроїв, розроблено Simulink-моделі механічного компонента емнісного МЕМС-акселерометра, досліджено поведінкове моделювання розробленої моделі. Розроблено Simulink-модель МЕМС-акселерометра замкнутого контуру з ПД регулюванням та похідним фільтром і проведено моделювання акселерометра у Matlab/Simulink.

#### 3.1 Методологія проектування та моделювання МЕМС-акселерометрів

Для розв'язання задач проектування МЕМС-пристроїв та їх компонентів, як правило, використовується блочно-ієрархічний підхід. Даний підхід передбачає використання:

- принципу ієрархічності для структурування представлень про об'єкти за ступенем деталізації описів;
- принципу декомпозиції, зокрема, блочності, модульності для розбиття представлень кожного рівня на складові (довершені блоки) з можливістю їх проектування поблоково.

Комп'ютерне моделювання дозволяє визначати механічні та фізичні параметри компонентів МЕМС-пристрою, також знаходити оптимальні конструктивні співвідношення, не вдаватись у дорогі експериментальні дослідження. В результаті, комп'ютерне моделювання та його автоматизація є одним із основних засобів розвитку МЕМС.

Математичне моделювання систем проводиться у різних областях техніки і природничих наук. Моделювання системи допомагає пояснити поведінку системи та її компонентів, а також передбачити їх реакції в різних середовищах та умовах.

З появою МЕМС було проведено широкі дослідження чисельного моделювання значного числа МЕМС-пристроїв, кожне з яких має свої переваги. Існують різні методи та техніки, що використовуються для моделювання, зокрема, аналітичне моделювання ємнісних МЕМС-акселерометрів.

Інерційні МЕМС-сенсори, такі як акселерометри та гіроскопи, мають складні, а іноді значні нелінійні взаємодії між інерційними та електричними сигналами, механічними напругами в балках тощо. Тому чисельне моделювання механічних компонентів пристрою та моделювання на рівні схеми Spice електроніки зчитування та керування, якщо вони виконуються окремо в різних програмних середовищах, може бути недостатнім для імітації поведінки системи уцілому. Таким чином, спільне моделювання на системному рівні, є важливим для точного моделювання та прогнозування поведінки системи.

Моделювання на основі інформаційних потоків (моделі блок-схем) відображає математичну поведінку, що знаходиться поза межами динаміки системи, і має високий рівень абстракції. Цей тип моделювання характеризується компонентами (або блоками), які означають причинно-наслідковий зв'язок у системі, що має блоки, роз'єми, входи, виходи, змінні стани та спрямованість інформаційних сигналів. Отже, моделювання з використанням блок-схем підходить для опису вузла або частини системи керування [12].

У даній роботі розглянуто модель керування з ПД-регулюванням та зчитування МЕМС-акселерометра замкнутого контуру. При проєктування врахлюються різні аспекти моделювання: від малих сигналів до моделей сигналів, включаючи моделювання з компонентами схем, що забезпечують стабільність в структурах МЕМС-акселерометрів.

На рис. 3.1 показано методологічне представлення етапів аналізу та моделювання ємнісного акселерометра.

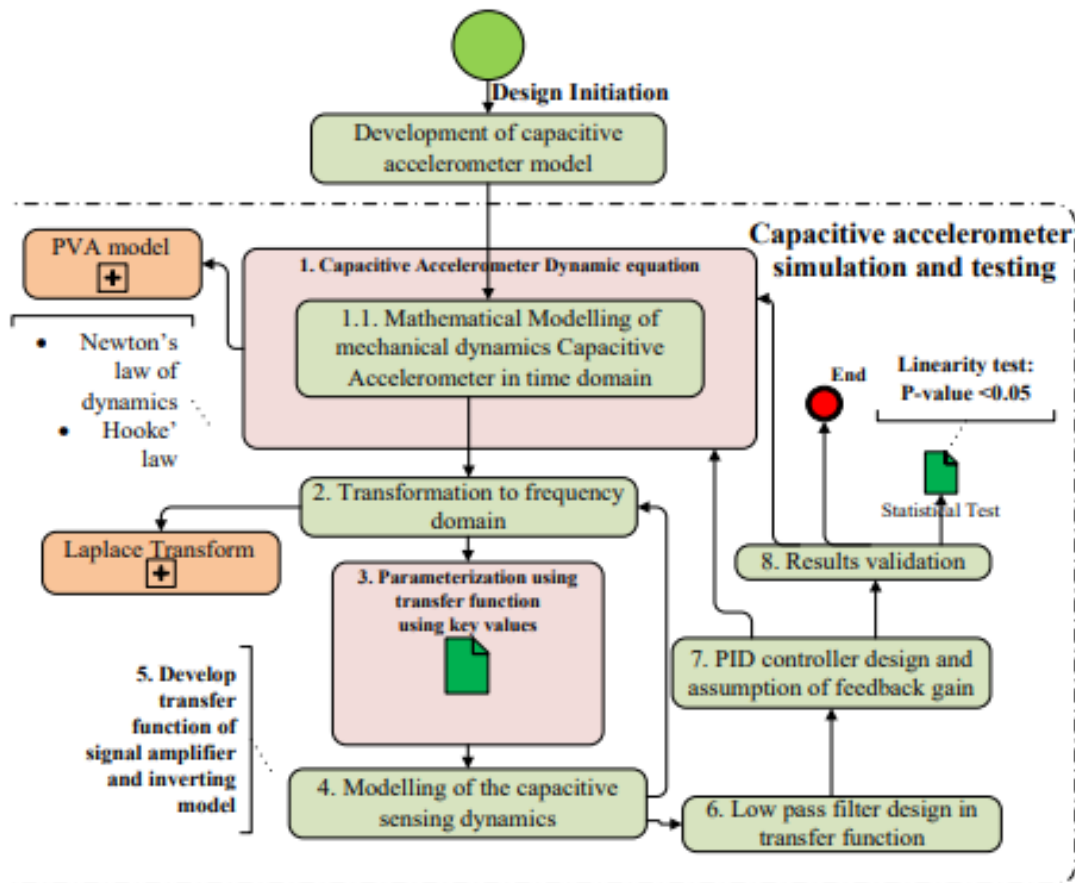


Рисунок.3.1 - Етапи аналізу та моделювання ємнісного акселерометра

Метод аналізу та моделювання акселерометра полягає у математичному моделюванні динаміки системи рухомої ІМ акселерометра з використанням законів фізики та має кілька етапів.

Розглянемо основні моменти проектування. Поперше, при аналізі МЕМС-акселерометра створюється модель ємнісної динаміки зондування, яка характеризується зміною ємності під час руху об'єкта (транспортного засобу).

На наступному етапі виконується розробка передавальної функції моделі. При розробці передавальної функції моделі здійснюється інвертування та підсилення вихідного сигналу за допомогою операційного підсилювача. Для спрощення обчислень сигнали моделі обробляються в частотній області. Модель системи містить блок ФНЧ, який фільтрує низькочастотні шуми. ФНЧ дозволяє використовувати низьку частоту для

отримання кращих результатів вимірювання змінних положення акселерометра.

Етап дослідження механічної моделі акселерометра, пов'язаний з аналізом його конструкції та підсилення коефіцієнта зворотного зв'язку і виконується шляхом корекції коефіцієнтів підсилення регулятора та коефіцієнта підсилення зворотного зв'язку для отримання вихідних характеристик акселерометра, що відповідають технічним вимогам.

### 3.2 Пакет Matlab/Simulink для дослідження динамічних моделей

Пакет Simulink дозволяє здійснювати дослідження поведінкової моделі динамічної системи (моделювання у часі). Утворення чисельної моделі досліджуваної системи здійснюється шляхом графічного складання у спеціальному вікні схеми з'єднань елементарних візуальних блоків, що містяться у бібліотеках Simulink.

Кожний блок фактично являє собою математичну програму. Лінії з'єднання блоків перетворюються на зв'язки між цими програмами, які дозволяють визначити послідовність виклику програм і пересилання інформації. У результаті такого складання утворюється програмна модель, яку називають Simulink-моделлю. Такий процес утворення обчислювальних програм прийнято називати візуальним програмуванням.

Розширення системи Matlab/Simulink є простим у використанні при моделюванні систем та пристроїв, головне вікно системи приведено на рис. 3.2. Створення моделей у пакеті Simulink ґрунтується на використанні технології Drag-and-Drop. При побудові Simulink-моделі використовуються модулі (блоки), що зберігаються в бібліотеці Simulink. 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 у

системі. Для цього використовуються спеціальні блоки "оглядові вікна", що входять до складу бібліотеки Simulink [13].

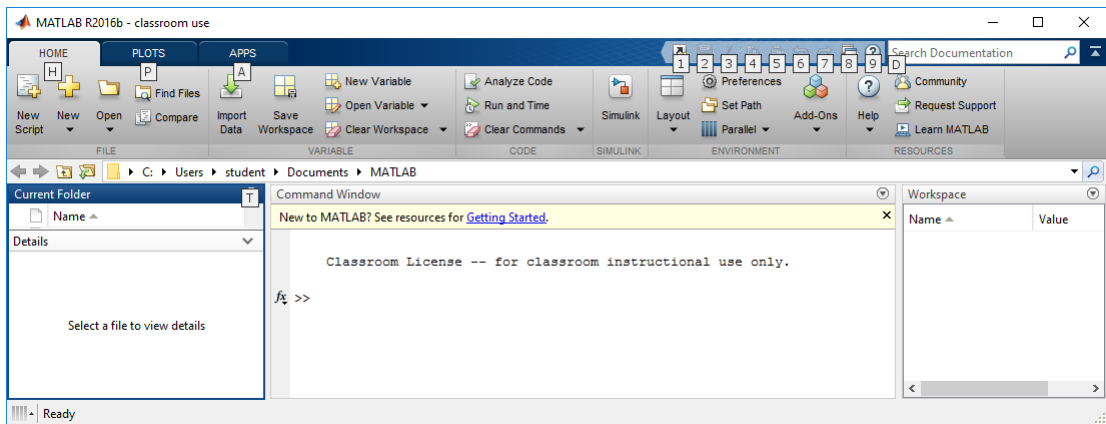


Рисунок 3.2 – Головне вікно системи Matlab/Simulink

Склад бібліотеки Simulink може бути поповнений користувачем за рахунок розробки власних блоків. На рис. 3.3 зображено браузер Simulink-бібліотеки. Використання пакету Matlab/Simulink є особливо зручним при моделюванні систем, які складаються із з'єднаних певним чином окремих функціональних пристроїв.

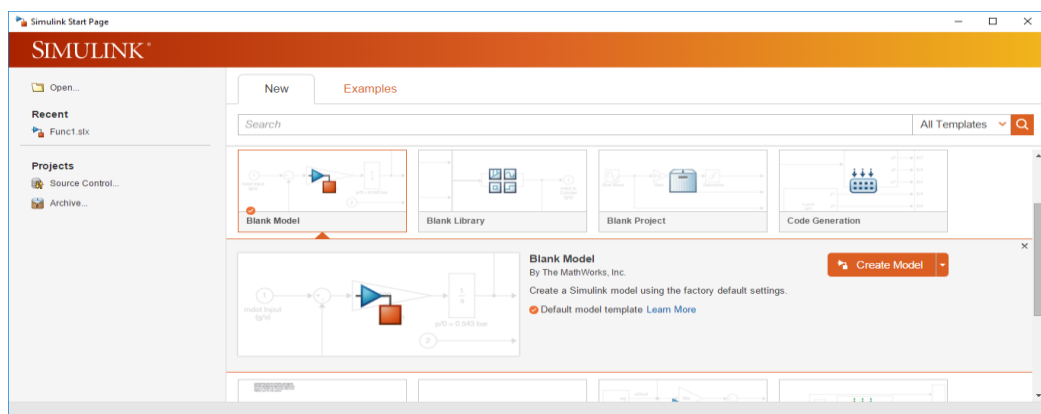


Рисунок 3.3 – Simulink Library Browser

Поведінка блоків має математичний опис. В результаті схема з'єднань візуальних блоків у вікні блок-схеми Simulink-моделі збігається з реальними

зв'язками між даними пристроями, що суттєво спрощує програмний аналіз і синтез систем управління. Компоненти Simulink-бібліотеки застосовуються для побудови моделей блок-схем систем реального часу на основі потоку інформаційних сигналів.

В Matlab/Simulink існує можливість виконувати моделювання на базі подій, моделювання фізичної системи, а також виконувати верифікацію і валідацію проєкту та тестування моделі у реальному часі [14]. Моделювання здійснюється на основі потоку сигналів. Вікно браузера бібліотеки включає певні елементи (рис. 3.4) а отже: заголовок; панель інструментів, яка містить ярлики команд; вікно коментаря для повідомлення про обраний блок; список розділів бібліотек та список розділів або блоків бібліотеки, що вкладені.

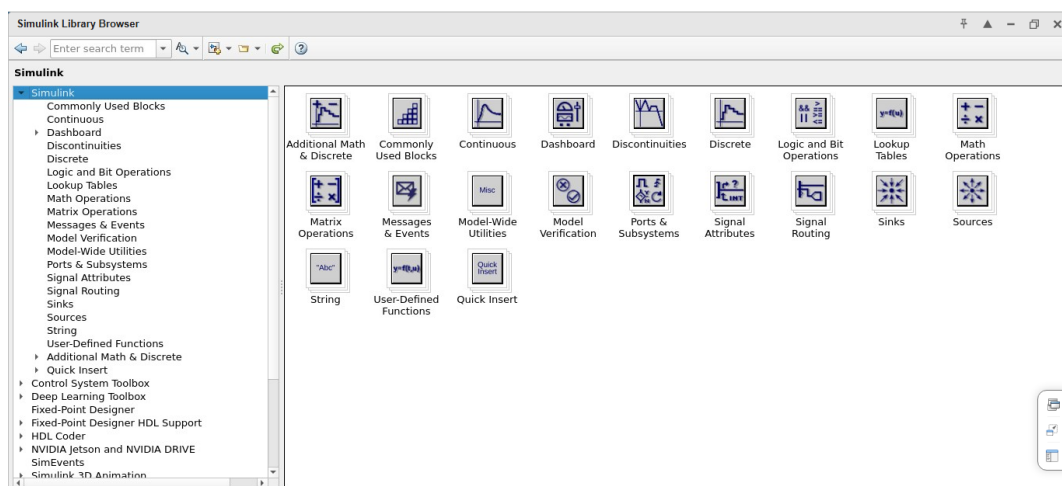


Рисунок 3.4 – Вікно браузера бібліотеки Simulink та її компонентів

У розширенні Simulink для створення певних моделей систем застосовується візуально-орієнтований спосіб побудови моделей. Даний спосіб передбачає побудову структур, які складаються шляхом переміщення певних обраних блоків з бібліотеки у поле Simulink-документа. Далі обрані блоки з'єднуються у схему направленими лініями для створення Simulink-моделі. Для дослідження динаміки процесу потрібно використання кнопки Run, що запускає динамічний процес (рис.3.5).

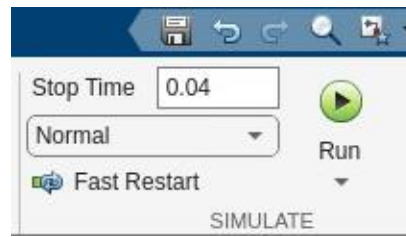


Рисунок 3.5 – Поле часу розрахунку та кнопка запускання динамічного процесу Run

### 3.3 Simulink-модель сенсорного компонента МЕМС-акселерометра та поведінкове моделювання

У програмному середовищі Simulink для моделі системи розроблені графічні модулі. Дані модулі можуть бути обрані для створення структур систем для динамічного дослідження. Значення коефіцієнтів, які є у математичних описах рівнянь та передавальних функцій МЕМС-акселерометра задаються у компонентах та блоках структури Simulink-моделі у середовищі Matlab/Simulink. Параметри сигналу входу системи встановлюються у блоках джерел сигналів: блоку джерела одиничної функції або блоку джерела гармонійного сигналу.

МЕМС характеризуються двонаправленою взаємодією між електричними та механічними складовими даних систем. Зокрема, у ємнісних МЕМС-акселерометрів зовнішнє механічне прискорення переміщує внутрішні пластини конденсатора всередині пристрою, тим самим викликаючи зміну ємності. Дана величина використовується як вимірювана величина акселерометра, що означає потік енергії з механічної області в електричну. Для забезпечення стабільності роботи пристрою при дії зовнішніх сил і покращення чутливості акселерометра, використовується негативний зворотний зв'язок, що має різницевої сигнал електричної напруги, яка прикладена до електродів з паралельними пластинами. При

цьому, що потік енергії змінюється від електричної до механічної підсистеми акселерометра.

У роботі було розроблено Simulink-модель сенсорного компонента MEMS-акселерометра з метою аналізу поведінки сенсора (рис.3.6). Сенсорний компонент ІМ MEMS-акселерометра вбудований у контур зворотнього зв'язку. Стопер (контролер) обмежує переміщення ІМ, і перед початком моделювання стопер має відхил від певного положення спокою. Контролер містить два входи, а отже, вхід прискорення, що діє на сенсорний компонент і вхід переміщення пробної ІМ.

Зовнішня сила інерції є сигналом входу системи, вона діє на чутливий елемент, що є пробною масою. В системі сигнали виходу являють собою реакцію на сигнал сили інерції: сигнали переміщення  $x$ , швидкості  $V$  і прискорення маси  $a$ . Вихідними даними для проведення моделювання були прийняті наступні дані: пробна ІМ  $m=2$  кг, початкова швидкість  $\dot{y} = 0$  м/с, початкове переміщення  $x = 0$  м, коефіцієнт демпфірування  $c = 2$ , коефіцієнт жорсткості пружини  $k = 3,5$ . При моделюванні на вхід системи подається сигнал - одинична ступінчаста функція  $f(t) = 1$ .

При моделюванні Simulink-модель елемента сенсора акселерометра на виході моделі з'являється сигнал відгуку, який являє собою нелінійну характеристику сенсорного елемента, якщо ІМ буде обмежена при торканні механічним стопером. У даному випадку переміщення буде перевищувати деяке значення  $x_{\max}$ . В результаті швидкість руху пробної ІМ зменшується до «0», внаслідок цього блок Integrator1 буде скинутий у «0». У моделі початкове переміщення ІМ може дорівнювати «0» і задаватись величиною  $x_0$ , як початкова умова для 2-го інтегратора. На вході моделі встановлений блок підсумовування, який підсумовує зовнішні і внутрішні сили, що діють на пробну ІМ.



тощо. Завдяки створеній моделі може бути здійснено прогнозування стабільності контуру керування і дослідження відношення «сигнал – шум». Вплив на ІМ ємнісного МЕМС-акселерометра постійного прискорення відповідає процесу динаміки моделі у стаціонарному (встановленому) режимі. Для дослідження даного режиму на вхід системи подається одинична ступінчаста функція  $f(t)=1(t)$ .

На рис. 3.7, 3.8 приведено результати моделювання Simulink-моделі. Рис. 3.7 демонструє вихідну характеристику залежності переміщення ІМ від сили інерції сенсорного компонента акселерометра, на якому видно, що зі збільшенням сили інерції переміщення пробної ІМ зростає нелінійно внаслідок руху пробної ІМ. Даний процес описаний диференціальним рівнянням 2-го порядку. Поведінкове моделювання у середовищі розширення Simulink дозволяє виконувати системне моделювання в реальному часі.

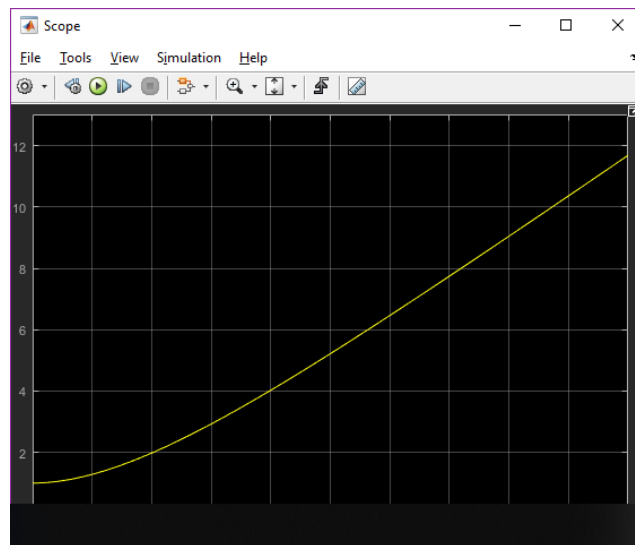
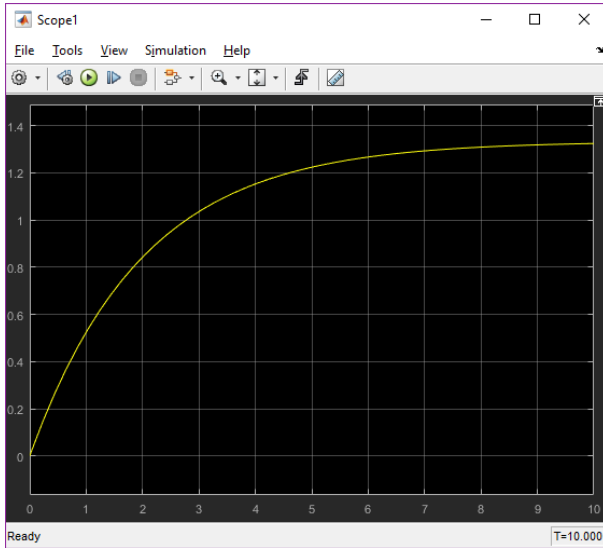
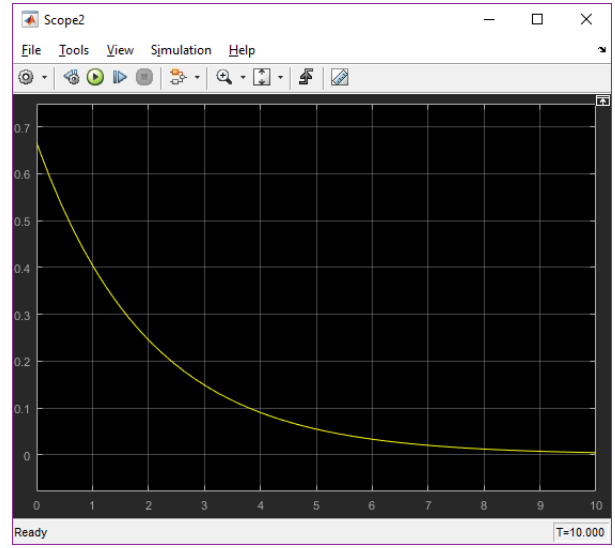


Рисунок 3.7 – Вихідна характеристика переміщення ІМ від сили інерції

На рис. 3.8 зображено вихідні характеристики сенсорного компонента акселерометра: нелінійні залежності швидкості і прискорення ІМ від сили інерції. На графіках видно, що при збільшенні сили інерції швидкість ІМ нелінійно зростає, а прискорення ІМ від сили інерції нелінійно зменшується.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Вихідні характеристики сенсорного компонента акселерометра: швидкості (а) та прискорення (б) інерційної маси від сили інерції

#### 3.4 Simulink-модель MEMS-акселерометра замкнутого контуру з ПІД-регулятором та результати моделювання

У роботі розроблено та досліджено Simulink-модель акселерометра замкнутого контуру як у часовій, так і у частотній областях з метою відстеження поведінки транспортного засобу.

Модель ємнісного акселерометра використовує принцип позиційно-швидкісного прискорювача за допомогою моделі «переміщення-швидкість-прискорення» для перетворення прискорення транспортного засобу у його переміщення (положення).

На рис. 3.9 приведено Simulink-модель акселерометра замкнутого контуру у безперервній функції часу з вхідним прискоренням і всіма силами, що діють на акселерометр. Вихідні дані системи дають переміщення пробної ІМ (переміщення/положення ( $x$ )).

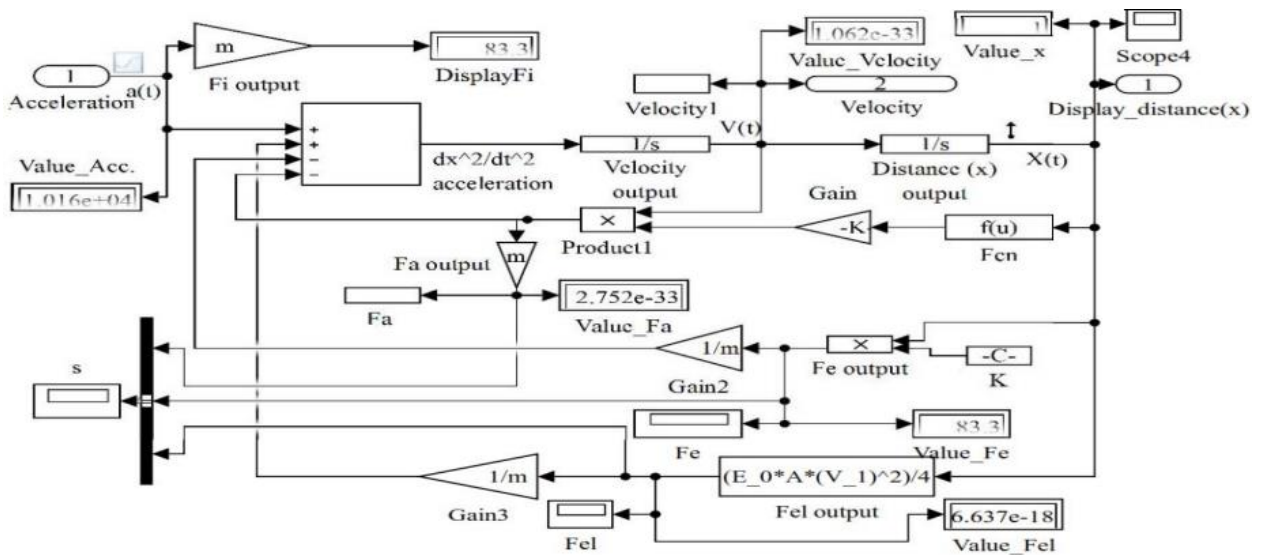


Рисунок 3.9 – Simulink- модель акселерометра замкнутого контуру у безперервній часовій області

На рис. 3.10 показано розроблену повну Блок-схема акселерометра відкритого контуру з демодулятором та ФНЧ. Схема акселерометра замкнутого контуру з одиничним зворотним зв'язком і містить паралельний ПД-регулятор, що застосовується з метою зменшення або усунення похибки у стаціонарному режимі.

Вихідний сигнал акселерометра має майже лінійну залежність переміщення від ступінчастої функції вхідного сигналу прискорення поданої на вхід системи. У даній моделі сигнал ступінчастої функції використовується в якості еталонного, що є типовим сигналом на вході системи. При цьому значення прискорення дорівнює  $a = 1 \text{ g}$ .

Результати моделювання Simulink-моделі акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулятором приведені на рис. 3.11 – 3.13, які співпадають з результатами у роботі [12].



На рис. 3.12 показано, як збільшення прискорення  $a$  від 1 g до 5 g може точно передбачити вимірювальну відстань та має аналогічні характеристики.

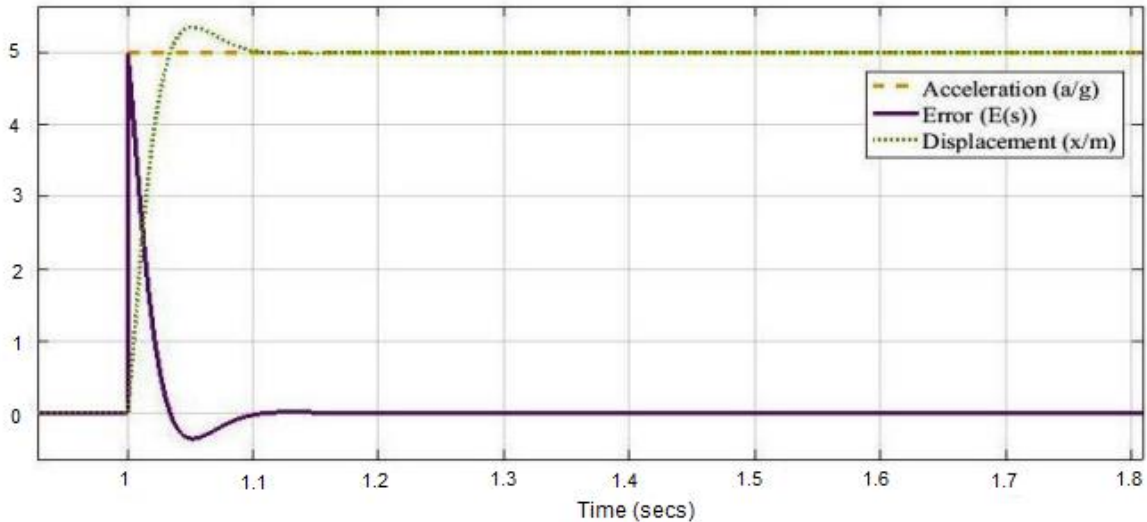


Рисунок 3.13 – Графік залежностей прискорення( $a=1$  g), переміщення( $x=5$  m) та системної помилки( $e=0$ ) за 1,1 с

Акселерометр сгенерував точну лінійну залежність переміщення від ступінчастої функції вхідного сигналу прискорення. Дослідження показують, що значення прискорення  $\pm 1$  сили тяжіння g створює переміщення  $\pm 1$  м. Система створює початковий сплеск із часом перехідного процесу приблизно 0,1 с. Графік з аналогічними характеристиками отримано і для прискорення  $\pm 5$  g час перехідного процесу складає 0,1 с при збільшенні значення прискорення до 5 g.

### 3.5 Simulink-модель акселерометра замкнутого контуру з похідним ФНЧ та результати моделювання

В роботі було розроблено Simulink-модель ємнісного МЕМС-акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулятором та похідним ФНЧ для проведення дослідження у частотній області. ФНЧ, включений у структуру

системи для зменшення низькочастотних шумів у сигналі виходу системи (рис 3.14).

Модель має одиничний зворотний зв'язок і передавальну функцію, що складається з передавальної функції паралельного ПІД-регулятора, механічної частини, детектування сигналу та фазочутливості в одній моделі, а також передавальної функції похідного ФНЧ.

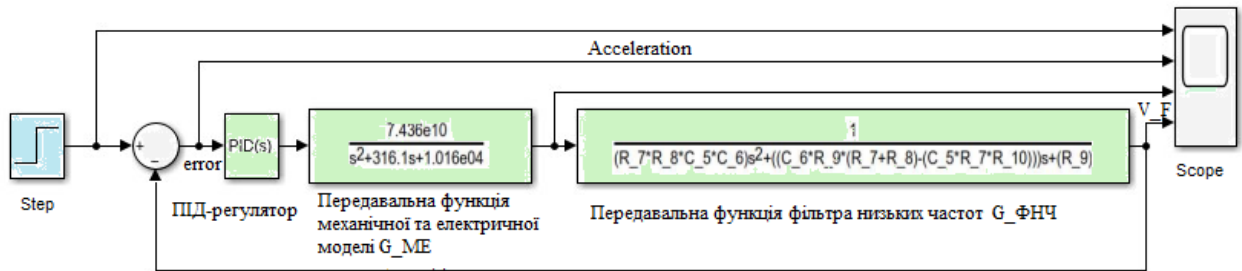


Рисунок 3.14 – Simulink-модель акселерометра з ПІД-регулятором та похідним фільтром

При моделюванні були отримані робочі значення коефіцієнтів підсилення пропорційного, інтегрального, диференціального компонентів для налаштування ПІД-регулятора з обраним коефіцієнтом затухання похідного фільтра, які наведені у табл. 3.1 та результат порівняння з табл. 2.1.

Таблиця 3.1 – Отримані коефіцієнти підсилення ПІД-регулятора

	Коефіцієнт П-регулятора	Коефіцієнт І-регулятора	Коефіцієнт Д-регулятора	Коефіцієнт затухання ФНЧ
Розраховані результати	$k_p=0,00225$	$K_i=0.122$	$k_d=0,0000046$	$N=7180$
Отримані результати	$k_p=0,00223$	$k_i=0.123$	$k_d=0,000005$	$N=7180$

Отримані результати приблизно співпадають з розрахованими, що підтверджує працездатність розробленої Simulink-моделі.

Simulink-модель акселерометра генерує графіки залежності, які приведені на рис. 3.15. На графіку видно, що вхідний ступінчастий сигнал прискорення  $a=1\text{ g}$  призводить до переміщення ІМ  $V_F=1\text{ m}$  після випередження сигналу, що триває менше ніж 0,1 секунди.

Аналогічний вхідний сигнал прискорення  $5\text{ g}$  також викликає переміщення, яке дорівнює  $5\text{ m}$ , що спостерігається в характеристиках частотної області. Спостереження демонструють, що конструкція акселерометра здатна передбачити лінійну пропорціональну залежність переміщення транспортного засобу від будь-яких змінних наборів прискорень.

Використання ПД-регулятора з похідним фільтром забезпечує значне покращення у прогнозуванні лінійної залежності між прискоренням і переміщенням, ніж традиційний підхід безперервного налаштування ПД-регулятора для стабільності системи акселерометра.

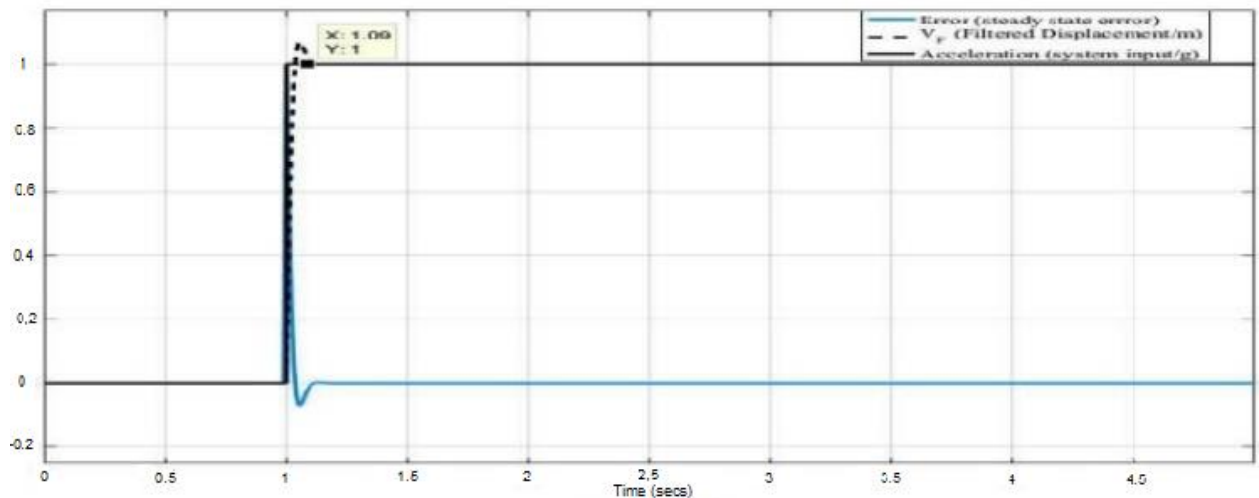


Рисунок 3.15 - Характеристики ємнісного акселерометра замкнутого контуру з ПД-регулятором і похідним фільтром

Модель ємнісного акселерометра із замкнутим контуром здатна визначати переміщення/положення автомобіля за допомогою моделі «переміщення-швидкість-прискорення».

Схема замкнутого контуру розроблена для подолання похибки у стаціонарному режимі, що утворюється в еквівалентній конструкції відкритого контуру. Таким чином, використання паралельного ПД-регулятора з похідним ФНЧ, включеним у структуру для зменшення низькочастотних шумів у сигналі виходу системи акселерометра з одиничним зворотним зв'язком, продемонструвало усунення похибки в встановленому режимі.

## ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена методам побудови моделей інерційних сенсорних МЕМС-компонентів та їх моделюванню з використанням пакету Matlab/Simulink.

У першому розділі проведено огляд перспектив динаміки ринку МЕМС-пристроїв та сенсорів на найближчі роки, що свідчить про його стійке зростання, розглянуто загальну схему вбудованої мікросистеми та використання МЕМС-акселерометрів у транспортних засобах.

У другому розділі розглянуто принцип дії та рівняння динаміки акселерометра, проаналізовано електричну модель ємнісного МЕМС-акселерометра, проаналізовано ПІ- та ПІД-регулювання в акселерометрах замкнутого контуру, розглянуто Simulink-моделі МЕМС-акселерометрів замкнутого контуру з ПІ- та ПІД-регулюванням. Проаналізовано використання похідного фільтра у складі акселерометрів для корекції характеристик системи. Розглянуто передавальні функції в системі акселерометра з урахуванням ПІД-регулювання та похідного ФНЧ по ланцюгу «прискорення – переміщення інерційної маси».

У третьому розділі розглянуто особливості проектування та моделювання МЕМС-пристроїв в середовищі Matlab/Simulink. Розроблено Simulink-модель сенсорного компонента МЕМС-акселерометра з використанням пакету Matlab/Simulink та проведено поведінкове моделювання, отримано графіки залежностей, що підтверджують математичні моделі механічної складової акселерометра. Розроблено Simulink-модель ємнісного акселерометра замкнутого контуру з одиничним зворотним зв'язком, яка містить паралельний ПІД-регулятор із похідним ФНЧ, що використовується з метою подолання похибки перехідного процесу і забезпечення стабільності роботи у стаціонарному режимі. Simulink-модель використовує принцип «переміщення-швидкість-прискорення» для перетворення прискорення транспортного засобу у відстань (переміщення).

Було проведено моделювання як в часовій, так і у частотній області з метою відстеження транспортного засобу. В процесі моделювання МЕМС-акселерометр дає точну лінійну залежність переміщення від ступінчастої функції вхідного сигналу прискорення. Використання паралельного ПД-регулятора з похідним ФНЧ, включеним у структуру для зменшення низькочастотних шумів у сигналі виходу системи акселерометра з одиничним зворотним зв'язком, продемонструвало усунення похибки в стаціонарному режимі. Отримані характеристики підтверджують переваги використання моделі акселерометра зі зворотним зв'язком та ПД-регулюванням.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Михайло Лобур, Михайло Мельник. Основи мікросистемних пристроїв. // Навчальний посібник: Національний університет «Львівська політехніка», Львів. – 2016.– 258 с.
2. Lammel G., The future of MEMS sensors in our connected world/ G. Lammel // Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), – 2015. – P. 61–64.
3. Andrabi Z. and Gupta K. A. Study and Analysis of Materials for Design of MEMS Capacitive Accelerometer. / Z. Andrabi and K. A. Gupta. // 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2018. – P. 2183-2187.
4. Szermer M., Amrozik P., Zajac P., Maj C., Napieralski A. Capacitive MEMS accelerometer with open-loop switched-capacitor readout circuit. / M. Szermer, P. Amrozik, P. Zajac, C. Maj, A. Napieralski // International Journal of Microelectronics and Computer Science, Vol 8. No4. – 2017.– P. 139-145.
5. Мошунов Д.О., Моделювання сенсорних МЕМС-компонентів з використанням пакету Matlab/Simulink / О.С. Шкіль, Д.О. Мошунов // Проблеми інформатизації: тези доп. 12-ї міжнар. наук.-техн. конф., 21-22 листопада 2024 р., Баку – Харків – Бельсько-Бяла: . Т. 3 : секція 5 / Інститут систем управління МНО Азербайджанської республіки [та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – С. 109.
6. Alsalem A. and Zohdy M. Sensitivity Analysis of MEMS Accelerometer for the Vibration Measurement of VTOL UAV. / A. Alsalem and M. Zohdy. // 2023 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP), Nashville, TN, USA. – 2023. – P. 320-325.
7. Jangra, M., Arya D. S., Khosla R. and Sharma S. K. Design and Simulation of Capacitive Z-axis MEMS Accelerometers using SU-8, PolySi, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, and SiC-based structural materials. / M. Jangra, D. S. Arya, R. Khosla and

S. K. Sharma // 2020 5th IEEE International Conference on Emerging Electronics (ICEE), New Delhi, India. – 2020. – P. 1-4.

8. Ivan Ivanov, Valeriy Skryshevsky. Application of Microsystems devices. Tutorial // Навчальний посібник: Київ. – 2016. – 374 с.

9. Філяшкін М.К. Мікроелектромеханічні системи. // Навчальний посібник – К.: НАУ, 2019. – 276 с.

10. P. Chen, J. Bai, S. Lou, Q. Lu, D. Han, and X. Jiao. Design of the closed-loop capacitive microaccelerometer based on PSpice. / P. Chen et al. // IEEE First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIS), – 2017. – P. 1-4.

11. Mamudu Hamidu, Kponyo Jerry, Amevi Acahpovi. Innovative Prediction of Vehicle Position Based on Closed Loop Modeling of Capacitive Accelerometer./ M. Hamidu, J.Kponyo, A.Amevi // IEEE International Conference on Cyber Security and Internet of Things (ICSIoT), Kumasi – 2019. – P. 54-61.

12. Mamudu Hamidu, Kponyo Jerry. Closed Loop Capacitive Accelerometer Model using Simple Regression Test for Linearity/ M. Hamidu et al.// Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, ASTES – Vol. 6, No. 2 – 2021. – P. 1038-1045.

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

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