МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КАФЕДРА АЕРОКОСМІЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
_____Юрій МЕЛЬНИК
“____”_____ 2023 р.

КВІЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ

“БАКАЛАВР”

Тема: Визначення параметрів диференціального балочного акселерометра, в якому усунена синхронізація частот

Виконавець Овчар Ярослав Вікторович
Керівник: В.В. Чіковані
Нормоконтролер: В.В. Чіковані

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управлення

Спеціальність 151 «Комп’ютеризовані системи управління та автоматика»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____Юрій МЕЛЬНИК

“____”_____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Овчар Ярослав Вікторович

(прізвище, ім’я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Визначення параметрів диференціального бал очного акселерометра, в якому усунена синхронізація частот

Затверджена наказом ректора від “ 13 ” квітня 2023 р. № 507/ст

2. Термін виконання роботи: з 28.03.2023 по 12.06.2023

3. Вихідні дані до роботи: Резонансна частота вібраційного акселерометра не менше 1 кГц, діапазон вимірювання не менше 5g, чутливість до прискорення (масштабний коефіцієнт) МК 50 Гц/g

4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1 Принцип роботи диференційного балочного акселерометра; Розділ 2 Диференційний вібраційний акселерометр;

Розділ 3 Вибір параметрів резонансних балок для забезпечення завданої чутливості та діапазону вимірювання акселерометра; Висновки; Список літератури.

5. Перелік ілюстративного матеріалу презентації: Графіки та результатів розрахунків. Матеріали презентації в Power Point

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Уточнення постановки задачі	28.03.2023	виконано
2.	Збір інформації	29.03.2023	виконано
3.	Аналіз літературних джерел	10.05.2023	виконано
4.	Розробка детального змісту дипломної роботи	13.05.2023	виконано
5.	Вступ	16.05.2023	виконано
6.	Розділ 1. Принцип роботи види та етапи виготовлення балочних акселерометрів	20.05.2023	виконано
7.	Розділ 2. Диференційний вібраційний акселеромет	24.05.2023	виконано
8.	Розділ 3. Вибір параметрів резонансних балок для забезпечення завданої чутливості та діапазону вимірювання акселерометра	30.05.2023	виконано
9.	Оформлення роботи	02.06.2023	виконано

7. Дата видачі завдання: “28” березня 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ В.В. Чіковані

(підпис керівника (П.І.Б))

Завдання прийняв до виконання _____ Я.В. Овчар

(підпис студента(П.І.Б))

РЕФЕРАТ

Текстова частина роботи: 70 стор, 21 рис.,

Об’єкт дослідження – Диференційний балочний акселерометр

Предмет дослідження – Параметри диференціального балочного акселерометра та їх вплив на точність вимірювань

Мета роботи – Визначення параметрів диференційного балочного акселерометр в якому усунена синхронізація частот з метою покращення точності вимірювань

Методи дослідження – Теоретичний аналіз та експериментальні дослідження з використанням моделювання в середовищі MATLAB

Короткий зміст роботи: Для досягнення цієї мети був проведений аналіз впливу різних параметрів на точність вимірювання та був розроблений метод визначення їх параметрів. Результатом роботи буде встановлення оптимальних параметрів диференційного балочного акселерометра та розробка рекомендацій щодо його використання в конкретних умовах

У роботі було визначено основні завдання, що були розв’язані для досягнення поставленої мети, а саме:

1. Аналіз літературних джерел та практичного досвіду використання диференційних балочних акселерометрів.
2. Аналіз принципу роботи види та етапи виготовлення балочних акселерометрів
3. Проаналізували принцип роботи конструкцію та як відбувається синхронізація частот у диференційного вібраційного акселерометра

4. Оцінка можливості зменшення похибок при вимірюванні.

5. Зробили Вибір параметрів резонансних балок для забезпечення завданої чутливості та діапазону вимірювання акселерометра**.**

6. Проведені розрахунки параметрів резонансних балок для забезпечення завданої чутливості та діапазону вимірювання акселерометра

Отже, висновки цього дослідження матимуть практичне значення для розробників та виробників балочних акселерометрів, які прагнуть поліпшити продуктивність своїх пристроїв. Крім того, ці результати можуть бути використані в наукових дослідженнях, де точність вимірювання прискорення важлива для отримання достовірних результатів

Зміст

Кафедра АКСУ				НАУ 23.23.28 ПЗ			
Розроб.	Овчар Я.О.			ЗМІСТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Керівник	Чіковані В.В.					7	1
Консульт.					151-301-СУ		
Н.контр.	Чіковані В.В.						
Зав. кафедри	Мельник Ю.В.						

Вступ

Диференціальний балочний акселерометр є важливим пристроєм, який використовується для вимірювання прискорень у різних відносних системах координат. Він є критично важливим для навігаційних систем, космічних апаратів, авіаційної техніки та інших застосувань, де потрібні точні виміри прискорень.

Однак, існують певні проблеми, пов’язані з синхронізацією частот у традиційних балочних акселерометрах, що можуть вплинути на точність вимірювання. Синхронізація частот є важливим аспектом для досягнення правильних результатів, але може бути складною задачею через вплив зовнішніх факторів, таких як шум та перешкоди.

Цей дипломний проект має на меті вивчення та визначення параметрів диференціального балочного акселерометра з усунутою синхронізацією частот. Основна ідея полягає в тому, що замість синхронізації частоти використовується новий підхід, який дозволяє зменшити вплив шуму та перешкод на точність вимірювань.

Для досягнення цієї мети, буде проведений теоретичний аналіз та моделювання диференціального балочного акселерометра з використанням сучасних методів та алгоритмів обробки сигналів. Дослідник також планує провести експериментальні вимірювання з метою зібрати реальні дані та порівняти їх з результатами моделювання.

Очікується, що результати цього дослідження допоможуть визначити оптимальні параметри диференціального балочного акселерометра з усунутою синхронізацією частот. Це може привести до поліпшення точності вимірювання прискорення та забезпечення надійності в різних областях застосування.

Висновки цього дослідження матимуть практичне значення для розробників та виробників балочних акселерометрів, які прагнуть поліпшити продуктивність своїх пристроїв. Крім того, ці результати можуть бути використані в наукових дослідженнях, де точність вимірювання прискорення важлива для отримання достовірних результатів.

Таким чином, даний дипломний проект пропонує новий підхід до визначення параметрів диференціального балочного акселерометра з усунутою синхронізацією частот. Його ціллю є покращення точності вимірювання прискорення та надання рекомендацій для подальшого вдосконалення таких пристроїв у майбутньому.

Розділ 1

Принцип роботи види та етапи виготовлення балочних акселерометрів

1.1. Принцип роботи диференційного балочного акселерометра

Диференційний балочний акселерометр є одним із типів акселерометрів, який використовується для вимірювання прискорення об’єкта. Він базується на принципі руху маси відносно жорсткого фіксованого тіла під дією прискорення.

Принцип роботи диференційного балочного акселерометра полягає у вимірюванні зсуву (диференційного переміщення) датчика під впливом прискорення. Він складається з жорсткої основи і крихкої балки, яка може вільно рухатися вздовж однієї осі. На балці розташована маса, яка відповідає за перенесення прискорення на датчик.

Коли акселерометр знаходиться у спокійному стані без прискорення, балка знаходиться у своєму рівноважному положенні. Проте, коли на об’єкт діє прискорення, маса на балці зазнає зміщення відносно жорсткої основи, оскільки маса має тенденцію зберігати свою початкову позицію в просторі.

Зміщення маси на балці вимірюється за допомогою датчика, наприклад, підсилювача деформації або датчика ємності. Цей датчик перетворює механічне переміщення в електричний сигнал, який можна виміряти та обробити.

Вимірювання зсуву маси на балці дозволяє визначити значення прискорення, яке діє на акселерометр. Залежно від конструкції акселерометра і датчика, сигнал може бути аналоговим або цифровим. В останньому випадку, отриманий сигнал може бути поданий на аналізатор спектра, мікроконтролер або інший.

1.2. Різні конструкції диференційного балочного акселерометра основаного на мікро-електро- механічних системах (МЕМС акселерометри)

Диференційні балочні акселерометри, що базуються на мікро-електро-механічних системах (МЕМС), є популярними варіантами акселерометрів завдяки своїй компактності, низьким вартостям та низькому енергоспоживанню. Основні конструкції МЕМС акселерометрів включають наступні:

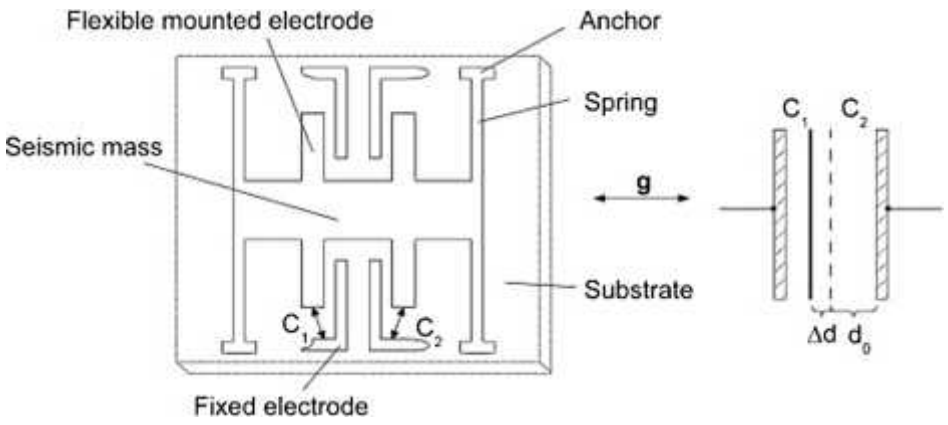
1. Капацитивні акселерометри: Ці акселерометри працюють на основі змін ємності між двома електродами, які зміщуються внаслідок прикладеного прискорення. Основний принцип роботи полягає в вимірюванні зміни ємності, яка виникає внаслідок зміщення маси, яка є частиною акселерометра.

Капацитивний акселерометр складається з маси (вібраційної маси), пружини та двох електродів (плат інтерфейсу). Маса з’єднана з пружиною, яка дозволяє їй зміщуватися прикладаючи прискорення. Електроди знаходяться поруч з масою, і ємність між ними залежить від відстані між ними.

Коли акселерометр прискорюється, маса зміщується, змінюючи відстань між електродами. Це призводить до зміни ємності між ними. Зміна ємності відображає прикладене прискорення.

Для вимірювання зміни ємності використовується метод капацитивного датчика. Зазвичай, акселерометри мають електронну схему, яка вимірює зміну ємності і перетворює її на вихідний сигнал, який відображає значення прискорення.

Таким чином, капацитивний акселерометр працює, визначаючи зміну ємності між електродами, яка виникає внаслідок зміщення маси прикладеного прискорення.



2. П’єзорезистивні акселерометри: Вони працюють на основі ефекту п’єзорезистивності, тобто зміни опору матеріалу при зміні механічного напруження, викликаного прискоренням.

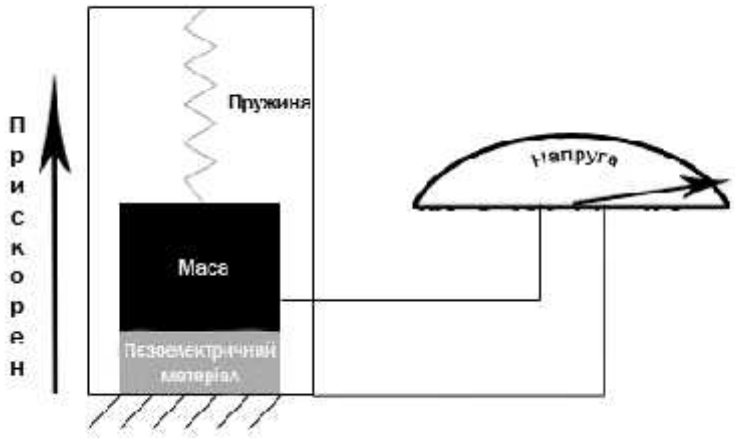
Основний принцип роботи п’єзорезистивних акселерометрів полягає в вимірюванні зміни опору п’єзорезистивних елементів, які знаходяться в акселерометрі. Зазвичай, акселерометри мають резистивні стрижні або плівки, зроблені з матеріалів, які проявляють п’єзорезистивний ефект, наприклад, кремнію.

Коли на акселерометр діє прискорення, маса внутрішнього елементу акселерометра зміщується, викликаючи зміну механічного напруження у п’єзорезистивних елементах. Це змінює опір п’єзорезистивних елементів.

Зміна опору зчитується за допомогою вбудованих датчиків або мікрохем з п’єзорезистивними стрижнями або плівками. Ці датчики перетворюють зміну опору в електричний сигнал, який відображає величину та напрямок прискорення.

Електричний сигнал, отриманий з п’єзорезистивних елементів, може бути засилений до підсилювача та подальше оброблений електронною схемою для підсилення, фільтрації та обробки даних прискорення.

Отже, п’єзорезистивний акселерометр працює, вимірюючи зміну опору п’єзорезистивних елементів, яка виникає внаслідок зміщення маси рикладеного прискорення.



3. Тунельно-п’єзорезистивні акселерометри: Ці акселерометри працюють на основі комбінації тунельного ефекту і п’єзорезистивного ефекту.

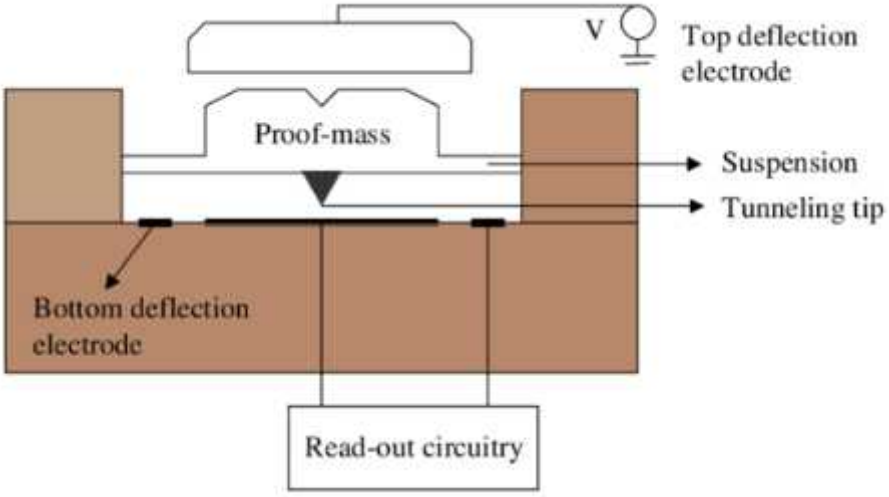
Основний принцип роботи тунельно-п’єзорезистивних акселерометрів полягає в вимірюванні зміни опору, що виникає внаслідок зміщення маси прикладеного прискорення.

Ці акселерометри використовують п’єзорезистивні матеріали, такі як напівпровідникові нанопровідники або металеві плівки, що мають властивість змінювати свою опірність при зміні механічного напруження.

Тунельний ефект виникає в областях зі зменшеною шириною простору, в якому електрони можуть "протунелювати" через бар’єрну область, що розділяє дві електроди. Це явище можна використовувати для вимірювання змін опору.

У тунельно-п’єзорезистивних акселерометрах маса зміщується під дією прикладеного прискорення, що викликає зміну механічного напруження в п’єзорезистивних матеріалах. Це змінює їх опірність. За допомогою вимірювальних пристроїв (наприклад, мікрохем) зчитується зміна опору та перетворюється на вихідний сигнал, який відображає значення прискорення.

Таким чином, тунельно-п’єзорезистивний акселерометр працює, вимірюючи зміну опору п’єзорезистивних матеріалів, яка виникає внаслідок зміщення маси прикладеного прискорення, та використовуючи тунельний ефект для зчитування зміни опору.



4. Кварцові акселерометри: У цих акселерометрах використовують кварцовий кристал як основний елемент для вимірювання прискорення. Принцип роботи кварцового акселерометра базується на використанні п’єзоелектричного ефекту, який властивий кварцу.

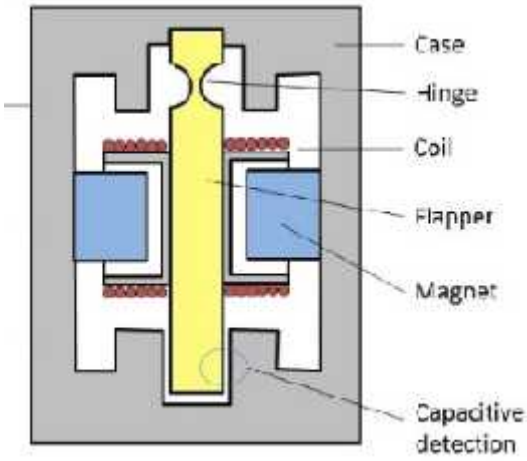
Кварцовий кристал має властивість змінювати свою форму та генерувати електричний заряд при зміщенні або прикладенні механічного напруження. Цей ефект називається п’єзоелектричним ефектом.

В кварцовому акселерометрі кварцовий кристал використовується як маса, яка може зміщуватися прикладенням прискорення. Коли маса зміщується, це викликає деформацію кварцового кристала і генерацію п’єзоелектричного заряду.

Генерований п’єзоелектричний заряд зчитується за допомогою електродів, які розташовані на кварцовому кристалі. Цей заряд вимірюється та перетворюється на вихідний сигнал, який відображає значення прискорення.

Кварцові акселерометри є досить точними та стабільними, оскільки кварцовий кристал має високу стабільність, низьку температурну залежність та малу гістерезис. Вони здатні вимірювати як низькі, так і високі частоти прискорення.

Отже, кварцовий акселерометр працює на основі п’єзоелектричного ефекту кварцового кристала, вимірюючи зміну п’єзоелектричного заряду, яка виникає внаслідок зміщення маси прикладеного прискорення.



5. П’єзокерамічні акселерометри: Ці акселерометри використовують п’єзоелектричні керамічні матеріали, які мають властивість змінювати свою форму та генерувати електричний заряд при зміщенні або прикладенні механічного напруження. Принцип роботи п’єзокерамічних акселерометрів базується на цьому п’єзоелектричному ефекті.

Основний принцип роботи п’єзокерамічного акселерометра полягає в вимірюванні генерованого п’єзоелектричного заряду, який виникає при зміщенні маси прикладеного прискорення.

У п’єзокерамічному акселерометрі п’єзокерамічний матеріал використовується як маса, яка може зміщуватися під дією прикладеного прискорення. Коли маса зміщується, це викликає деформацію п’єзокерамічного матеріалу і генерацію п’єзоелектричного заряду.

Згенерований п’єзоелектричний заряд зчитується за допомогою електродів, які розташовані на п’єзокерамічному матеріалі. Цей заряд вимірюється та перетворюється на вихідний сигнал, який відображає значення прискорення.

П’єзокерамічні акселерометри відрізняються високою жорсткістю, широким діапазоном робочих частот і високою чутливістю. Вони здатні вимірювати як низькі, так і високі частоти прискорення.

Отже, п’єзокерамічний акселерометр працює на основі п’єзоелектричного ефекту п’єзокерамічного матеріалу, вимірюючи зміну п’єзоелектричного заряду, яка виникає внаслідок зміщення маси прикладеного прискорення.

Ці різні конструкції МЕМС акселерометрів використовуються для вимірювання прискорення в різних діапазонах і з різними параметрами, такими як діапазон вимірювання, точність і розмір. Вони широко використовуються в мобільних пристроях, автомобілях, навігаційних системах, медичному обладнанні та інших застосуваннях, де потрібно вимірювати прискорення.

1.3.Виробники МЕМС

Кілька провідних виробників акселерометрів на основі МЕМС-технологій включають:

1. STMicroelectronics: STMicroelectronics виробляє широкий спектр МЕМС-акселерометрів для різних застосувань, включаючи автомобільну електроніку, споживчу електроніку та промислові пристрої.

2. Bosch Sensortec: Bosch Sensortec є відомим виробником MEMC-акселерометрів для мобільних пристроїв, IoT (інтернет речей) та інших застосувань. Вони пропонують широкий асортимент акселерометрів з різними діапазонами вимірювання та високою точністю.

3. InvenSense (закуплений TDK): InvenSense, що належить TDK, є одним з провідних виробників MEMC-акселерометрів та гіроскопів. Вони пропонують продукти для мобільних пристроїв, віртуальної реальності, автомобільної електроніки та інших ринків.

4. Analog Devices: Analog Devices (ADI) також виробляє MEMC-акселерометри з високою точністю та низьким шумом. їх продукти застосовуються в авіації, автомобільній електроніці, медицинському обладнанні та інших вимогливих промислових додатках.

5. Murata Manufacturing: Murata Manufacturing є виробником MEMC-акселерометрів, які застосовуються в автомобільній електроніці, мобільних пристроях та споживчій електроніці. Вони пропонують компактні та високопродуктивні акселерометри з різними специфікаціями.

Це лише кілька прикладів провідних виробників MEMC-акселерометрів, і ринок постійно розвивається з’явленням нових учасників та інноваційних продуктів

1.4. Параметри акселерометрів MEMC

Капацитивні акселерометри, які використовуються в мікро-електро-механічних системах (MEMC), мають різні параметри, які визначають їх характеристики та продуктивність. Основними параметрами капацитивних акселерометрів є:

1. Діапазон вимірювання (Range): Це максимальне значення прискорення, яке акселерометр може виміряти. Наприклад, діапазон може бути від ±2g до ±200g, де 1g відповідає прискоренню вільного падіння через силу тяжіння.

2. Роздільна здатність (Resolution): Це мінімальне значення прискорення, яке акселерометр може розрізняти. Вона визначає точність вимірювання акселерації. Наприклад, роздільна здатність може бути виражена в мікрогаусах (µg) або мілігаусах (mg), в залежності від діапазону.

3. Лінійність (Linearity): Це міра відповідності акселерометра до лінійної характеристики прискорення. Більша лінійність вказує на більшу точність вимірювання.

4. Шум (Noise): Шум в акселерометрі відображається як випадкові відхилення вимірювань від фактичного значення прискорення. Низький рівень шуму важливий для отримання точних результатів.

5. Чутливість (Sensitivity): Це співвідношення між вихідним сигналом акселерометра і величиною прикладеного прискорення. Вона вимірюється у вольтах на одиницю прискорення (наприклад, мілівольта на г).

6. Частотна характеристика (Frequency Response): Це діапазон частот, в якому акселерометр може достовірно вимірювати

1.5 Вібраційні балочні акселерометри та принцип його роботи

Вібраційні балочні акселерометри є пристроями, які використовуються для вимірювання прискорення та вібраційних сигналів. Вони базуються на принципі використання резонансу балки для виявлення прискорення.

Вібраційний балочний акселерометр складається з наступних основних компонентів:

1. Чутлива балка: Це основний елемент акселерометра, який зазвичай представляє собою тонку, гнучку і пружну структуру. Балка може бути виготовлена з різних матеріалів, таких як п’єзоелектрики (наприклад, кварц), полімери, кремній або інші матеріали з високою стійкістю і низькою масою.

2. Маса: На кінцях чутливої балки розташовані маси або важільки, які допомагають створити резонансний ефект під час коливання. Маси

забезпечують збудження балки та збільшення амплітуди коливання при прикладенні прискорення.

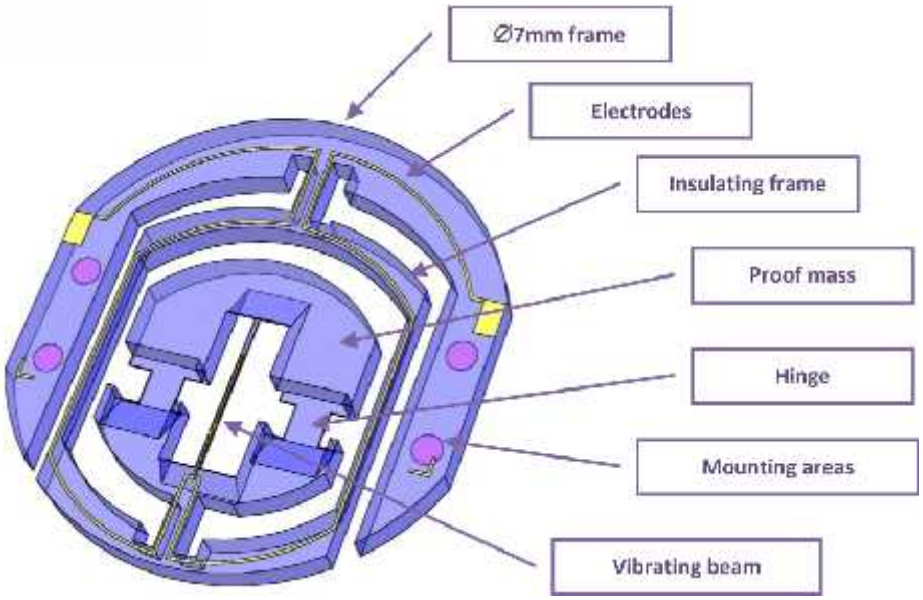
3. Датчики: На балці розташовані датчики, які реєструють коливання балки і перетворюють їх на електричний сигнал. Ці датчики можуть бути п’єзоелектричними, що генерують електричне зарядження при зміщенні або деформації, або ж датчики, які використовуються для вимірювання змін опору, ємності або інших електричних параметрів.

4. Електроніка: Вимірювальні сигнали з датчиків передаються до електронної схеми акселерометра, яка забезпечує підсилення, фільтрацію та обробку сигналів. Електроніка також може мати інтерфейс для зв’язку зі зовнішніми пристроями або системою зберігання даних.

5. Живлення: Акселерометр може потребувати живлення, яке може бути забезпечене батареями, акумуляторами або зовнішнім джерелом енергії.

6. Корпус: Вібраційний балочний акселерометр зазвичай має корпус або упаковку, яка захищає його компоненти від зовнішнього середовища та впливу зовнішніх факторів, таких як вологість, пил, вібрації тощо.

Всі ці компоненти взаємодіють між собою для забезпечення вимірювання прискорення та генерації вихідного сигналу, який відображає прискорення, що діє на акселерометр.



Принцип роботи вібраційного балочного акселерометра базується на використанні резонансу балки для виявлення прискорення. Він включає наступні кроки:

1. Прикладання прискорення: Коли на акселерометр діє прискорення, балка починає коливатися.

2. Резонанс: Якщо частота коливання балки співпадає з її резонансною частотою, коливання стають найінтенсивнішими.

3. Генерація сигналу: Коливання балки призводять до генерації електричного сигналу. Цей сигнал є пропорційним до прискорення, яке діє на акселерометр.

4. Вимірювання сигналу: Електричний сигнал, згенерований балкою, може бути виміряний та записаний для подальшої обробки та аналізу.

5. Обробка та інтерпретація сигналу: Отриманий сигнал може бути оброблений для визначення значень прискорення та характеристик вібрацій.

У вібраційному балочному акселерометрі, коливання балки відбуваються у випадку, коли на неї діє прискорення. Залежно від прикладеного прискорення,

балка збуджується до коливання з власною резонансною частотою. Коливання можуть бути амплітудною (амплітуда коливання залежить від величини прискорення) та фазовою (фаза коливання змінюється відповідно до фази прикладеного прискорення).

Зазвичай вібраційні балочні акселерометри мають п’єзоелектричні матеріали, такі як кварц або кераміка, у яких виникає електричне зарядження при зміщенні або деформації матеріалу. Коли балка коливається, п’єзоелектричний матеріал генерує електричні заряди, які вимірюються як вихідний сигнал акселерометра.

Датчики, розташовані на балці, сприймають зарядження, що виникає від п’єзоелектричного матеріалу, і перетворюють його на вимірювальний сигнал, який може бути оброблений та зареєстрований для подальшого аналізу. Цей сигнал відображає амплітуду і фазу коливання балки, що відповідають прискоренню, яке діє на акселерометр.

Для отримання точних вимірювань прискорення вібраційні балочні акселерометри можуть мати компенсаційні схеми для усунення шумів, нелінійностей та впливів температури. Також, вони можуть мати кілька осей вимірювання для визначення прискорення у різних напрямках.

За допомогою принципу роботи вібраційних балочних акселерометрів можна вимірювати прискорення в широкому діапазоні частот та досліджувати різні типи вібрацій та рухів.

Це загальний принцип роботи вібраційного балочного акселерометра. Застосування вібраційних акселерометрів є широким у багатьох галузях, включаючи техніку, автомобільну промисловість, машинобудування, аерокосмічну технологію та багато інших.

1.6. Технології виготовлення

Технологія виготовлення балочних акселерометрів може варіюватися залежно від типу акселерометра, але основні етапи їх виготовлення включають наступні процеси:

1. Вибір матеріалу: Для виготовлення балочних акселерометрів часто використовуються кристалічні матеріали, такі як кремній або полікремній. Ці матеріали мають високу механічну стійкість і можуть бути опрацьовані з високою точністю.

2. Чистка субстрату: Субстрат, зазвичай кремнієва пластина, проходить процес очищення, щоб видалити будь-які забруднення та забезпечити гладку поверхню для подальшої обробки.

3. Літографія: На поверхні субстрату використовують фоточутливий шар, який піддається експозиції з використанням маски, що визначає шаблон структури балки акселерометра. Після експозиції проводиться процес фоторезисту для видалення незапечатаних ділянок шару.

4. Етап мокрого травлення: Застосовується хімічне травлення, де розчини використовуються для видалення матеріалу з незапечатаних ділянок. Цей процес створює пусті простори або резонатори у структурі балки.

5. Нанесення датчиків: На балку акселерометра розміщуються датчики, які можуть бути п’єзорезистивними, п’єзоелектричними або ємнісними. Датчики перетворюють механічні зусилля, викликані прискоренням, на електричні сигнали.

6. Покриття: Балка акселерометра може бути покрита захисним шаром, щоб захистити її від зовнішнього середовища, вологи та пошкоджень.

7. Тестування: Виготовлений балочний акселерометр піддається ретельному тестуванню, включаючи калібрування, перевірку чутливості та стійкості до шуму.

8. Інтеграція: Завершені балочні акселерометри можуть бути з’єднані з електронікою, наприклад, збором даних, обробкою сигналу та інтерфейсом з іншими пристроями чи системами.

Варіації процесу виготовлення можуть існувати в залежності від конкретного типу та виробника балочного акселерометра. Технології, такі як мембранна літографія, нанодрук та мікроелектромеханічні системи (МЕМС), можуть також використовуватись для виробництва балочних акселерометрів.

1.7. Виготовлення ємнісних акселерометрів

Спосіб виготовлення ємнісних акселерометрів використовуючий технологію мікроелектромеханічних систем (МЕМС), передбачає використання стандартних процесів літографії та мікрофабрикації для створення мініатюрних акселерометрів на базі кремнію або скла. Основні кроки цього процесу включають наступне:

1. Початок з субстрату: В процесі МЕМС використовується пластина з кремнію або скла як субстрат для виготовлення акселерометра. Субстрат може бути очищений, щоб забезпечити чисту поверхню для подальшої обробки.

2. Нанесення фоточутливого шару: На поверхню субстрату наноситься шар фоточутливого матеріалу, такого як фоторезист, за допомогою спеціальних методів, наприклад, обрисовування або напилення.

3. Експозиція: Застосовується маска з шаблоном для створення потрібної геометрії електродів та структур акселерометра. Фоточутливий шар піддається експозиції ультрафіолетовим (УФ) світлом через маску, що спричиняє хімічні або фізичні зміни у шарі.

4. Розкриття: Після експозиції фоточутливого шару він проходить процес розкриття, де відбувається видалення незатверділих або розм’яклених частин шару, що відповідають запечатаним ділянкам.

5. Етап мокрого травлення: Використовуючи хімічне травлення, знімаються частини фоточутливого шару, що відповідають незапечатаним ділянкам. Це створює порожні простори між електродами та структурами акселерометра.

6. Нанесення металевих шарів: За допомогою методів напилення або відкладання паром металеві шари, такі як алюміній або золото, наносяться на поверхню субстрату. Ці шари створюють електроди, які використовуються для створення конденсаторів капацитивного акселерометра.

7. Покриття діелектриком: Для ізоляції електродів і створення зазору між ними наноситься шар діелектричного матеріалу, такого як оксид кремнію або нітрид кремнію. Це створює конденсатори змінної ємності, які реагують на прискорення.

8. Закриття та герметизація: Захисний шар, такий як полімер або скло, може бути нанесений, щоб захистити акселерометр від зовнішнього середовища і забезпечити механічну міцність.

9. З’єднання та інтеграція: Завершений капацитивний акселерометр може бути з’єднаний з електронікою, включаючи вимірювальні кола, підсилювачі сигналу та аналого-цифровий перетворювач (АЦП) для обробки та інтерпретації вимірювань прискорення.

Важливо зазначити, що процес виготовлення капацитивних акселерометрів за допомогою технології МЕМС може варіюватися в залежності від виробника та конкретної реалізації.

Для виготовлення МЕМС капацитивних акселерометрів використовуються різноманітні пристрої та устаткування. Основні пристрої, що використовуються в процесі виготовлення, включають:

1. Літографічні системи: Літографічні системи використовуються для нанесення шаблонів та масок на фоточутливий шар. Це необхідно для створення мікрошаблонів та структур на субстраті акселерометра.

2. Етапи нанесення шарів: Включає відкладальні системи парів або методи хімічного осадження, які використовуються для нанесення металевих шарів на субстрат. Ці металеві шари створюють електроди та інші компоненти акселерометра.

3. Хімічні системи: Хімічні системи використовуються для обробки поверхні, видалення непотрібних матеріалів та чистки акселерометра. Наприклад, хімічне травлення може використовуватись для створення пустот або камер всередині пристрою.

4. Відкладальні системи парів: Ці системи використовуються для відкладання діелектричних матеріалів, таких як оксид кремнію або нітрид кремнію, для створення діелектричних шарів між електродами акселерометра.

5. Експозиційні системи: Експозиційні системи використовуються для експозиції фоточутливих шарів під впливом ультрафіолетового (УФ) світла через маски. Це необхідно для створення точних мікроструктур та патернів на субстраті.

6. Устаткування для травлення: Використовується для хімічного травлення певних матеріалів, яке може бути використане для створення пустот або камер всередині акселерометра.

7. Устаткування для тестування та калібрування: Після виготовлення акселерометрів, їх можна піддавати тестуванню та калібруванню, використовуючи спеціалізоване устаткування, яке дозволяє перевірити їх характеристики та точність вимірювання.

Ці пристрої та устаткування використовуються в процесі виготовлення МЕМС капацитивних акселерометрів для створення мікроструктур, електродів,

діелектричних шарів та інших компонентів, які необхідні для роботи акселерометра.

1.8. виготовлення п’єзорезистивних акселерометрів

1. Вибір субстрату: Спочатку вибирається підходящий субстрат, яким зазвичай є кристалічний кремній (Si). Кремній має багато переваг, таких як широке поширення в індустрії, хороша механічна міцність і термостабільність.

2. Очищення субстрату: Перш ніж розпочати процес виготовлення, субстрат піддається обов’язковому процесу очищення, щоб видалити будь-які забруднення, бруд або залишки з поверхні субстрату. Це може включати хімічні процеси очищення, наприклад, використання розчинів або плазмової очистки.

3. Нанесення шарів: Після очищення субстрату починається нанесення шарів на його поверхню. Це досягається за допомогою технологій осадження, таких як хімічне осадження з газової фази (CVD) або фізичне осадження з газової фази (PVD).

- Пасивні шари: Спочатку наносяться пасивні шари, такі як оксиди, нітриди або полімери. Ці шари можуть використовуватись як діелектричні матеріали для ізоляції і захисту акселерометра.

- Активні шари: Потім наносяться активні шари п’єзорезистивного матеріалу, які змінюють свій опір під впливом механічного напруження. Такі матеріали можуть включати п’єзорезистивний кремній (приміський кремній з контрольованими домішками), полікристалічний кремній-германій або інші п’єзорезистивні матеріали.

4. Фотолітографія: Після нанесення шарів на поверхню субстрату використовується процес фотолітографії. Цей процес включає покриття шарів фоточутливою резистивною плівкою. Затім на плівку наноситься маска, яка містить бажаний геометричний малюнок або шаблон. Після цього плівка

освітлюється, що викликає зміну властивостей резистивної плівки в залежності від освітлення.

5. Етап травлення: Після фотолітографії використовується процес травлення. Травлення використовується для видалення резистивної плівки з місць, де потрібно створити п’єзорезистивні елементи. Це дозволяє створити фізичні структури п’єзорезистивних елементів на поверхні субстрату.

6. Депонування металевих контактів: Для підключення п’єзорезистивних елементів до зовнішнього кола наносяться металеві контакти. Це досягається за допомогою процесу осадження металевих шарів, таких як алюміній або мідь, на певних місцях на поверхні акселерометра. Ці металеві контакти дозволяють забезпечити електричне з’єднання зовнішніх колодок.

7. Упакування: Завершальний етап виготовлення акселерометра полягає в його упакуванні. Під час упакування акселерометр може бути захищений від зовнішнього середовища шляхом використання покриття або плівки. Крім того, акселерометр може бути кріплений до підставки або корпусу, щоб забезпечити механічну стійкість та зручність використання.

Конкретні кроки та параметри процесу можуть варіюватися в залежності від виробника та типу акселерометра.

Обладнання, що використовується для виготовлення п’єзорезистивних акселерометрів. Основні етапи виготовлення включають літографію, осадження, травлення, депонування контактів та упакування. Для кожного з цих етапів використовуються певні види обладнання.

1. Літографічні системи:

- Фотолітографічні станції: Ці станції використовуються для створення масок та перенесення малюнку на фоточутливу резистивну плівку на субстраті. Вони мають оптичні системи проекції, які забезпечують високу точність позиціонування та резолюцію.

- Фоточутливі резисти: Ці резисти є спеціальними матеріалами, які змінюють свої фізичні властивості під впливом світла. Вони використовуються для створення шаблонів масок на субстраті.

2. Обладнання для осадження:

- Хімічне осадження з газової фази (CVD): Це обладнання використовується для осадження тонких плівок матеріалів на поверхні субстрату. Процес CVD передбачає постачання газів у реактор, де відбуваються хімічні реакції та формування плівок.

- Фізичне осадження з газової фази (PVD): Це обладнання використовується для випаровування матеріалів та їх осадження на субстраті. Типи PVD включають евапорацію та cputter-осадження, які використовуються для формування тонких металевих плівок.

3. Обладнання для травлення:

- Реактивне йонне травлення (RIE): Це обладнання використовує плазму для високошвидкісного травлення матеріалу. RIE дозволяє виконувати точне травлення та формування мікроструктур.

- Мокре хімічне травлення: Для мокрого хімічного травлення використовуються хімічні розчини, що можуть видалити матеріал з певних областей субстрату.

4. Обладнання для депонування контактів:

- Електронно-променева літографія (EBL): Це обладнання використовується для створення мікроскопічних контактів на поверхні субстрату. Він використовує пучок електронів для розпилування матеріалів та створення дрібних друків.

- Електрофорезна депозиція: Цей процес використовуєся для нанесення тонких плівок на поверхню субстрату шляхом зарядження частинок та їх руху в електричному полі.

5. Упакувальне обладнання:

- Системи зборки: Для розміщення та з’єднання деталей МЕМС-пристроїв використовуються спеціальні системи зборки, які забезпечують точне позиціонування та з’єднання компонентів.

- Упакувальні станції: Після зборки п’єзорезистивні акселерометри піддаються упакуванню в підставки або корпуси, щоб забезпечити механічну стійкість та зручність використання.

Залежно від конкретного проекту та виробника, можуть використовуватись інші типи обладнання та процесів.

1.9. Опис виготовлення Тунельно-п’єзорезистивних акселерометрів:

1. Початковим етапом є виготовлення підкладки, яка буде використовуватися для акселерометра. Це може бути кремнієва чи скляна пластина.

2. На підкладку наноситься тонкий шар п’єзорезистивного матеріалу. Цей матеріал має властивість змінювати своє опір при зміні деформації.

3. На п’єзорезистивний шар наноситься тонкий шар ізоляційного матеріалу, який захищає п’єзорезистивний шар від зовнішнього впливу.

4. Застосовується фотолітографічний процес, де шаблон світлочутливого матеріалу накриває пластину. Після цього вона піддається експозиції під впливом світла.

5. Після експозиції виконується фотохімічне травлення, яке видаляє незахищений світлочутливий шар матеріалу. Цей процес використовує маску для створення дужок або прорізів у відповідних місцях.

6. Після травлення знімається шаблон і проводиться процес анізотропного травлення, який розширює прорізи, утворюючи глибокі кришталеві канавки.

7. Після виконання канавок в п’єзорезистивний шар вводяться контакти, що забезпечують електричний зв’язок з п’єзорезистивним матеріалом.

8. Потім на п’єзорезистивний шар наноситься кришталевий кільцевий об’ємний електрод, який забезпечує взаємодію з акселерометром.

9. На кільцевий електрод накладається захисний шар для захисту від зовнішніх впливів та забезпечення електричної ізоляції.

10. Завершальним етапом є збірка та упаковка акселерометра. Вона включає кріплення електричних контактів та захист акселерометра від зовнішнього середовища.

Після завершення цих кроків акселерометр готовий до використання. Він може бути інтегрований в різні пристрої, такі як мобільні телефони, навігаційні системи автомобілів, робототехнічні системи та інші пристрої, які вимагають вимірювання прискорення.

Виготовлення тунельно-п’єзорезистивних акселерометрів

1. Літографічна система: Цей прилад використовується для нанесення шаблонів та масок на підкладку акселерометра. Вона має оптичну систему, яка проеціює зображення шаблону на поверхню підкладки з високою точністю. Літографічна система дозволяє виконати точну і високопродуктивну фотолітографію.

2. Вакуумне напилення (PVD) або хімічне осадження з розчинів (CVD): Ці процеси використовуються для нанесення шарів матеріалів на підкладку. Вакуумне напилення використовує плавлення матеріалу у вакуумі та його осадження на поверхню підкладки, тоді як хімічне осадження з розчинів використовує хімічну реакцію для відкладення шару матеріалу.

3. Фотошаблони та маски: Ці шаблони, зазвичай виготовлені з фоточутливих матеріалів, використовуються для створення прорізів та шаблонів на підкладці. Вони можуть бути виготовлені за допомогою лазерної записувальної системи або електронно-променевої літографії.

4. Хімічне травлення обладнання: Це включає реактори та системи для хімічного травлення, які використовуються для створення кришталевих канавок та інших потрібних структур. Ці системи забезпечують контрольований процес травлення за допомогою хімічних реактивів та керують формою та глибиною канавок.

5. Обладнання для відкладання захисних шарів: Це можуть бути системи осадження з розчинів (CVD) або спрей-піролізу, які використовуються для нанесення захисних шарів на акселерометр. Ці системи забезпечують рівномірне та тонке нанесення захисних шарів для захисту акселерометра від зовнішніх факторів.

6. Травлення в плазмі: Це обладнання використовує плазмові розряди для очищення та обробки поверхонь. Воно дозволяє видаляти забруднення та органічні рештки з поверхні акселерометра перед нанесенням захисних шарів або контактів.

7. Тестувальне обладнання: Це включає спеціалізовані системи для вимірювання характеристик акселерометра, таких як чутливість, діапазон частот, стабільність тощо. Тестувальне обладнання може включати в себе вимірювальні пристрої, випрямні батареї, датчики часу та інші компоненти для аналізу і оцінки продукції.

Це лише загальний опис приладів та обладнання, які можуть використовуватися під час виготовлення тунельно-п’єзорезистивних акселерометрів з використанням технології МЕМС. Конкретні процеси та обладнання можуть варіюватися в залежності від виробничого середовища та підходів виробника.

1.10. Опис виготовлення Кварцових акселерометрів.

Основний процес виготовлення кварцового акселерометра включає наступні кроки:

1. Очистка підкладки: Починаючи зі скляної або кремнієвої підкладки, проводиться процес її очищення від забруднень. Це важливий крок, оскільки будь-які домішки можуть впливати на якість кінцевого пристрою.

2. Депозиція покриття: На підкладку наноситься тонкий шар кремнію або оксиду кремнію за допомогою методів хімічного осадження з розчину (CVD) або фізичного осадження з пари (PVD). Це створює діелектричний шар, необхідний для ізоляції електричних контактів.

3. Фотолітографія: На покритті наноситься фоточутливий шар, а потім використовуються маски та ультрафіолетове випромінювання для вирізання шаблонів на цьому шарі. Шаблони визначають структуру акселерометра і його компоненти.

4. Етапи етчінгу: Застосовуються хімічні розчини або плазма для видалення непотрібних матеріалів із шарів покриття. Цей процес формує механічні складові акселерометра, такі як рухома маса і пружні елементи.

5. Депозиція кварцового шару: Використовуючи методи хімічного осадження з розчину або фізичного осадження з пари, на механічні складові акселерометра наноситься тонкий шар кристалічного кварцу. Цей шар служить як датчик прискорення, оскільки він реагує на зміну прискорення, змінюючи свою форму і випромінюючи електричний сигнал.

6. Фотолітографія і етапи етчінгу (другий раз): Використовуючи такі ж методи, як і в кроці 3 та 4, створюються додаткові структури, такі як електроди, контакти і провідні шини, для підключення кварцового датчика до зовнішнього електричного кола.

7. Тестування і упакування: Завершальний етап включає тестування виготовленого кварцового акселерометра для перевірки його працездатності та калібрування. Після цього пристрій упаковується відповідно до вимог і готується для використання.

В цьому процесі основними кроками є очистка підкладки, депозиція покриття, фотолітографія, етапи етчінгу, депозиція кварцового шару, друга фотолітографія і етапи етчінгу, а також тестування та упакування. Комбінація цих кроків дозволяє створити мініатюрний кварцовий акселерометр, який може вимірювати прискорення з високою точністю.

Для виготовлення кварцових акселерометрів зазвичай використовуються спеціалізовані прилади та обладнання. Основні прилади, які застосовуються в процесі виготовлення, включають:

1. Літографічна система: Це складна система, що включає фотолітографічний стенд, оптичні пристрої та резервуари з фоточутливими розчинами. Літографічна система використовується для нанесення шаблонів на поверхні підкладки або покриття. Вона використовується для формування структур, таких як маски, електроди та провідні шини.

2. Хімічні резервуари та системи депозиції: Для хімічного осадження з розчину та фізичного осадження з пари використовуються спеціальні резервуари та системи. Ці системи забезпечують контрольовану депозицію матеріалів, таких як кремній або оксид кремнію, на поверхню підкладки чи покриття. Вони гарантують однорідну та точну товщину шару.

3. Системи етчінгу: Для видалення непотрібних матеріалів використовуються системи етчінгу. Ці системи можуть бути хімічними (з використанням хімічних розчинів) або плазмовими (з використанням плазми різного газу). Системи етчінгу дозволяють створювати структури, такі як рухомі маси та пружні елементи, шляхом видалення непотрібних матеріалів з поверхні.

4. Парові фази та плавильні печі: Для випаровування та осадження кварцового шару використовуються спеціальні парові фази та плавильні печі. Ці пристрої створюють умови для росту кристалів кварцу на поверхні підкладки або покриття.

5. Вакуумні камери: Деякі етапи виготовлення кварцових акселерометрів вимагають контрольованого середовища, такого як вакуум. Вакуумні камери використовуються для забезпечення вакуумних умов під час деяких процесів, наприклад, осадження кварцового шару.

Комбінування цих приладів та процесів дозволяє отримати мініатюрний та точний кварцовий акселерометр, який використовується для вимірювання прискорення та вібрації.

1.10. Опис виготовлення Кварцових акселерометрів.

Основним елементом п’єзокерамічного акселерометра є п’єзоелемент, який перетворює механічне прискорення на електричний сигнал. Виготовлення п’єзокерамічних акселерометрів включає кілька основних етапів. Давайте розглянемо детальніше процес виготовлення:

1. Підготовка субстрату:

- Обробка субстрату: Починається з підготовки субстрату, який може бути з кремнію або іншого матеріалу з високою провідністю та доброю механічною стійкістю. Субстрат очищається, полірується та може бути покритий тонким шаром діелектрика.

- Нанесення шару діелектрика: На субстрат наноситься тонкий шар діелектрика, що створює ізольовану основу для подальших шарів.

2. Нанесення п’єзокерамічного шару:

- Нанесення п’єзокерамічного матеріалу: На шар діелектрика наноситься шар п’єзокерамічного матеріалу. Це може бути зроблено, наприклад, за

допомогою методу хімічного осадження з розчину або фізичного осадження з пари.

- Витравлення п’єзокерамічного шару: За допомогою фотолітографії та етапу витравлення, непотрібні частини п’єзокерамічного шару видаляються, залишаючи лише необхідні структури для акселерометра.

3. Формування електродів:

- Нанесення фоторезисту: На п’єзокерамічний шар наноситься фоторезист, який використовується для вирізання візерунків електродів.

- Використання маски: Використовуючи фотолітографію, на фоторезист накладається маска з патерном електродів, яка визначає їхню форму та розташування.

- Витравлення металевих електродів: Після витравлення візерунків за допомогою ультрафіолетового світла, наноситься металевий шар, наприклад, алюміній або золото. Потім відбувається витравлення фоторезисту, залишаючи металеві електроди на п’єзокерамічному шарі.

4. Леґірування та травлення:

- Леґірування: Цей етап включає використання хімічних речовин для створення отворів, пазів та інших необхідних механічних структур. Леґірування може бути виконане шляхом хімічного висічення або механічного зношування матеріалу.

- Травлення: Витравлення використовується для видалення непотрібних шарів діелектрика, п’єзокераміки та металу, що дозволяє створити необхідну геометрію та отвори для акселерометра.

5. Збірка:

- Монтаж електроніки: Після виготовлення МЕМС-структур встановлюються інтегровані схеми, плати управління та інші електронні компоненти, які необхідні для роботи акселерометра.

- Паяння та з’єднання: Здійснюється процес паяння, щоб з’єднати різні компоненти разом. Також проводяться з’єднання проводами та контактами для підключення акселерометра до зовнішніх пристроїв.

При виготовленні п’єзокерамічних акселерометрів використовуються різні прилади та обладнання. Давайте розглянемо основні прилади, які використовуються на різних етапах виготовлення:

1. Літографічний сканер: Це пристрій, який використовується для нанесення фоторезисту на субстрат і для створення шаблонів патернів електродів та структур. Літографічний сканер використовує ультрафіолетове (УФ) світло для експонування фоторезисту відповідно до заданого візерунку.

2. Реактивний іонно-плазмовий етчер (RIE): Це пристрій для виконання процесу витравлення, який використовує реактивну плазму для видалення матеріалу з поверхні. RIE застосовується для витравлення непотрібних частин п’єзокерамічного шару, діелектрика або металевих електродів, залишаючи необхідні структури.

3. Пароосаджувач: Це обладнання, яке використовується для осадження тонкого шару п’єзокерамічного матеріалу на субстрат. Використовуючи процес фізичного осадження з пари (PVD), пароосаджувач нагріває п’єзокерамічний матеріал до високої температури, щоб його атоми осідали на поверхні субстрату і утворювали необхідний п’єзокерамічний шар.

4. Фотошаблони та маски: Це шаблони, які використовуються для створення візерунків електродів та інших структур на поверхні п’єзокерамічного шару. Фотошаблони зазвичай виготовляються з фоторезисту

або фоточутливого матеріалу, а маски - з металевих або скляних пластин з вирізаними отворами або візерунками.

5. Металевий осаджувач: Це обладнання, яке використовується для нанесення металевих електродів на поверхню п’єзокерамічного шару. Металевий осаджувач використовує методи фізичного осадження з пари (PVD) або хімічного осадження з розчину (CVD), щоб нанести тонкий шар металу, наприклад, алюмінію або золота.

Залежно від конкретних процесів та виробників можуть використовуватись різні комбінації приладів та обладнання.

1. 11. Виготовлення вібраційних балочних акселерометрів

1. Підготовка субстрата:

- Вибір субстрата: Зазвичай використовується кремній (Si) як основний субстрат для МЕМС-процесів. Субстрат повинен мати високу рівномірність та чистоту.

- Очищення субстрата: Субстрат піддається деконтамінації та очищенню від забруднень та домішок.

2. Виготовлення балки:

- Депонування п’єзорезонансного шару: На поверхню субстрата наноситься тонкий шар п’єзоелектричного матеріалу, такого як п’єзокераміка або п’єзополімер, за допомогою методів відкладання парової фази (PVD) або хімічного осадження з розчинів (CVD).

- Фотолітографія: Застосовується фотолітографічний процес, де фоторезист наноситься на п’єзоелектричний шар, а потім використовуються маска й ультрафіолетове світло для висвітлення фоторезисту і отримання шаблону геометрії балки.

- Етчінг: Використовуються хімічні етчінгові реагенти, які відбирають матеріал п’єзоелектричного шару, що не захищений фоторезистом, і формують балку з п’єзоматеріалу. Після етчінгу відбувається видалення фоторезисту.

3. Депонування металевих шарів:

- Депонування електродів: На поверхню п’єзоелектричного шару депонується тонкий металевий шар, такий як алюміній або золото, за допомогою методів вакуумного осадження (PVD) або електроосадження (Electroplating). Ці металеві шари використовуються як електроди для вимірювання струму або напруги, що виникають під час деформації п’єзоелектричного матеріалу.

- Фотолітографія і етчінг металевих шарів: Застосовується фотолітографічний процес, в якому фоторезист наноситься на металевий шар, а потім використовуються маска й ультрафіолетове світло для висвітлення фоторезисту і отримання шаблону геометрії електродів. Після цього відбувається етчінг металевих шарів, щоб утворити електроди з потрібною геометрією.

4. Збірка та запакування:

- Згортання різних шарів: Застосовуються техніки збірки, щоб згорнути п’єзоелектричний шар з балкою і металевими електродами, а також додатковими шарами і компонентами, які можуть включати провідники, вузли збору сигналів і мембрани захисту.

- Запакування: Виготовлений МЕМС-акселерометр пакується в підходящу оболонку або кристал для захисту від зовнішнього середовища і можливих пошкоджень.

5. Тестування:

- Функціональне тестування: Випробування проводяться, щоб перевірити основні функціональні характеристики акселерометра, такі як діапазон вимірювання, чутливість, лінійність і дрейф.

- Надійність: Випробування проводяться для оцінки надійності акселерометра, такі як тестування виносу, вібрацій, температури та старіння.

Це загальний опис процесу виготовлення вібраційних балочних акселерометрів з використанням технології МЕМС. Варто враховувати, що деталі та кроки можуть різнитися в залежності від конкретного виробника, технологій і вимог.

Виготовлення вібраційних балочних акселерометрів включає використання різних приладів та обладнання:

1. Літографічний стенд: Це складне обладнання, яке використовується для фотолітографічних процесів. Воно складається з ультрафіолетового джерела світла, масок, оптичних систем та автоматизованих систем позиціонування. Літографічний стенд використовується для нанесення шаблонів на фоторезист, які визначають геометрію шарів п’єзоелектрика та металевих електродів.

2. Етч-камера: Це спеціальна камера, яка використовується для хімічного етчінгу матеріалів. Вона має контрольовану атмосферу та хімічні реагенти, які відбирають матеріал і формують потрібні структури, наприклад, балки акселерометра.

3. Вакуумний осаджувальний апарат (PVD): Це пристрій, який використовується для вакуумного осадження тонких металевих шарів. Він використовує різні методи, такі як розпилення або евапорація металевого матеріалу, щоб нанести тонкий металевий шар на поверхню п’єзоелектрика або інші шари.

4. Електроосаджувальна система: Це обладнання, що використовується для електроосадження металевих шарів. Воно включає в себе резервуар з

електролітом, електроди та джерело електричного струму. Процес електроосадження використовується для отримання товстих металевих шарів, які можуть використовуватись як електроди акселерометра.

5. Обладнання для тестування: Для випробування виготовленого акселерометра використовуються різні прилади, включаючи вимірювальні прилади, які дозволяють оцінити його функціональні характеристики, наприклад, чутливість, діапазон вимірювання та стабільність. Також можуть використовуватись прилади для випробування надійності, такі як термокамери для тестування впливу температури, вібраційні стенди для випробування механічної стійкості тощо.

6. Метрологічне обладнання: Для виготовлення високоточних вібраційних балочних акселерометрів використовуються спеціалізовані метрологічні прилади. Ці прилади включають координатно-вимірювальні машини (CMM), оптичні мікроскопи, профілометри та інші прилади для вимірювання розмірів, форми та поверхневої шороховатості складних мікромеханічних структур. Вони допомагають забезпечити високу точність та якість виготовлення акселерометрів.

7. Чистота та контроль середовища: У процесі виготовлення MEMC-акселерометрів використовується чисте середовище для запобігання забрудненням та домішкам на поверхні субстрату та шарів. Для цього використовуються спеціальні приміщення, такі як чисті камери, з контрольованою температурою та вологою, а також фільтри, що очищують повітря від мікрочастинок.

8. Обробка та монтаж: Після виготовлення акселерометра його можуть піддавати додатковим процесам обробки, таким як обрізка і полірування субстрату для отримання необхідних розмірів та гладкості поверхні. Після цього акселерометр збирається в окремий пакет або кристал з додатковими електричними контактами для забезпечення зв’язку зі зовнішнім обладнанням.

9. Тестування якості: Виготовлений акселерометр піддається випробуванню для перевірки його функціональних характеристик, чутливості, лінійності, шуму та стійкості в різних умовах експлуатації. Це включа є тестування на різних рівнях прискорення, частотах, температурах та вологості, а також тестування впливу вібрацій та ударів.

10. Пакування та захист: Після виготовлення акселерометр потрібно захистити від зовнішнього впливу та забезпечити його надійність під час транспортування та використання. Для цього використовуються спеціальні упаковки, що забезпечують амортизацію, захист від ударів та вологості. Упакований акселерометр може бути додатково поміщений у захисні контейнери або коробки з електростатичним захистом.

11. Контроль якості та калібрування: Перед відправкою акселерометрів вони піддаються процедурі контролю якості та калібрування. Це включає перевірку відповідності функціональних характеристик акселерометра вимогам, а також визначення чутливості та лінійності вимірювання. Калібрування здійснюється за допомогою стандартних прискорювачів та точних вимірювальних приладів для забезпечення точності вимірювань акселерометра.

12. Документація та сертифікація: Після виготовлення акселерометрів генерується документація, яка містить технічні специфікації, керівництва з експлуатації та іншу важливу інформацію. Документація допомагає користувачам використовувати акселерометри належним чином. Крім того, акселерометри можуть підлягати сертифікації відповідно до стандартів та вимог, таких як ISO 9001, що підтверджують відповідність продукції стандартам якості та надійності.

Враховуючи всі ці етапи та використані прилади, виготовлення вібраційних балочних акселерометрів з використанням технології МЕМС є складним процесом, що вимагає спеціалізованого обладнання, контролю якості

та високої точності. Кожен крок має велике значення для забезпечення функціональності та надійності акселерометрів у вимірюванні прискорення.

Розділ 2

Диференційний вібраційний акселерометр

2.1. Принцип роботи диференційного вібраційного акселерометра

Вібраційний акселерометр використовує фізику гітарної струни. Резонансна частота струни змінюється, коли вона натягується в більшій або меншій мірі. Базова конструкція диференційного вібраційного акселерометра показана на рис. 2.1 [1]. Конструкція складається з двох балок довжиною l і масами m, що виходять зі спробної інерційної маси M. Балкам задають вібрацію в протифазі в одній площині на резонансній частоті балок, щоб знизити витрати енергії на зміщення спробної маси M і корпусу пристрою. Електронна система керує збудженням вібрацій на резонансній частоті при її зміні. Система керування збудженням побудована на основі фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ).

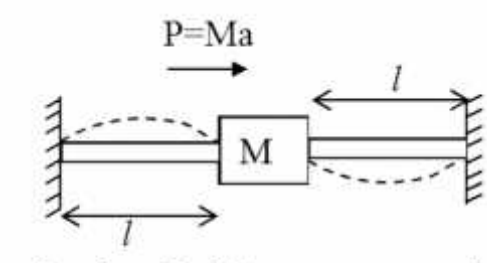


Рис. 2.1. Диференційний вібраційний акселерометр

Резонансна частота вимірюється і перетворюється на прискорення за допомогою масштабного коефіцієнта.

Принцип роботи диференційного вібраційного акселерометра можна пояснити, розглянувши спрощену модель, зображену на рис. 2.1, де балки вважаються абсолютно однаковими за масою і довжиною і не взаємодіють зі пробною масою M

Припустимо, що на систему, зображену на рис. 2.1 і вібруючу у протифазі, діє прискорення a, як показано на малюнку. Тоді ліва балка знаходиться під стискаючим навантаженням, рівним P=Ma, а права балка знаходиться під таким же розтягуючим навантаженням. Жорсткість навантаженої лівої балки K_l дорівнює:

$$K_l = \frac{1}{l^3} E + \frac{6P}{5l} , \quad (2.1)$$

де *E* - модуль Юнга матеріалу балки, *I* - момент інерції поперечного перерізу балки; *l* - довжина балки.

Жорсткість правої балки K_r дорівнює:

$$K_r = \frac{1}{l^3} E - \frac{6P}{5l} . \quad (2.2)$$

Резонансна частота розраховується за формулою:

$$\omega^2 = \frac{K}{m} . \quad (2.3)$$

Різницю квадратів частот двох балок можна знайти за виразом:

$$\omega_l^2 - \omega_r^2 = \frac{1}{ml^3} E + \frac{6P}{5m} - \frac{1}{m^3} E + \frac{6P}{5m} = \frac{1}{5m} P = \frac{1}{5l^2\rho} . \quad (2.4)$$

Тут маса балки $m=l$, ρ - щільність матеріалу балки, *A* - площа поперечного перерізу балки.

Різниця частот двох балок знаходиться з наступного виразу:

$$\omega_l - \omega_r = \frac{12Ma}{5l^2\rho A(\omega_l + \omega_r)} \quad (2.5)$$

Приріст резонансної частоти Δω при дії навантаження *P*=M*a*,, обумовленого прискоренням, зазвичай на порядок менший, ніж резонансна частота ω0 балки відсутність навантаження *P*, тобто:

$$\sqrt{\frac{1}{ml^3}\frac{E}{}} \ll \sqrt{\frac{\epsilon P}{5m}} \Rightarrow \omega_0 << \Delta\omega(P) . \qquad (2.6)$$

В цьому випадку можна записати:

$$\omega_l = \omega_0\sqrt{1+\left(\frac{\Delta}{\omega_0}\right)^2};\ \omega_r = \omega_0\sqrt{1-\left(\frac{\Delta}{\omega_0}\right)^2} \qquad (2.7)$$

Розкладаючи в ряд Тейлора кожен з цих виразів і додавши їх, отримаємо вираз для суми частот з точністю до величин третього порядку малості, вираз:

$$\omega_l+\omega_r=\omega_0\sqrt{1+\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2}+\omega_0\sqrt{1-\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2}\approx\omega_0\left(1+\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2\right)+\omega_0\left(1-\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2\right)= \qquad (2.8)$$

$$2\omega_0=\sqrt{\frac{48EI}{\rho Al^4}}$$

Таким чином, результуючі співвідношення для масштабного коефіцієнта (МК) та вихідного сигналу диференціального вібраційного акселерометра запишуться так:

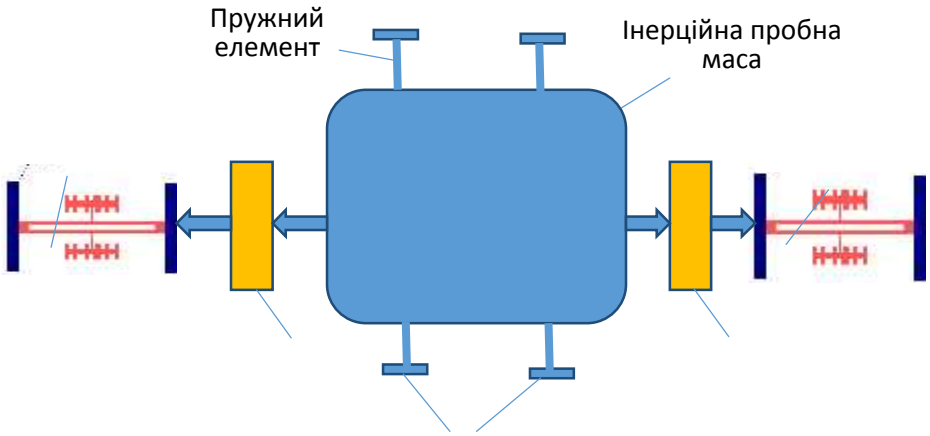
$$\omega_r-\omega_l\approx\frac{12Ma}{5l^2\rho A}\sqrt{\frac{\rho Al^4}{48EI}}=MK_{accel}a \qquad MK_{accel}=\frac{12M}{5}\sqrt{\frac{1}{48EI\rho A}}\approx 0.34641M\sqrt{\frac{1}{EI\rho A}} \qquad (2.9)$$

Оскільки резонансні частоти ω0 ненавантажених балок для спрощеня були покладені рівними одна одній, тобто $\omega_{0l}=\omega_{0r}=\omega_0$, то зміщення нуля акселерометра дорівнює нулю.

У реальному вібраційному акселерометрі резонансні частоти балок повинні бути розподілені, щоб уникнути синхронізації частот і виникнення зони нечутливості. Це досягається вибором різних товщин або довжин балок. В цьому випадку резонансні частоти лівої та правої не навантажених балок будуть різними, тобто $\omega_{0l} \neq \omega_{0r}$, і з'являється так звана частотна "підставка", яка представляє собою зміщення нуля акселерометра, рівне різниці $\omega_{0l} - \omega_{0r}$. Ця різниця повинна бути більшою, ніж максимальна зміна резонансної частоти, обумовлена діапазоном вимірювання прискорення.

2.2. Конструкція вібраційного диференційного акселерометра з посилюючим важелем

Структурна схема диференційного резонансного акселерометра показана на рис. 2.2 [2]. Акселерометр розроблено з ідеально симетричною диференціальною структурою.



Два ідентичних двосторонніх камертона (ДІДК) служать чутливими до напруги резонаторами. Два ДІДК розташовані симетрично та з'єднані інерційною пробною масою, яка перетворює прискорення в інерційну силу, яка пізніше посилюється у n разів за допомогою важеля перед тим, як передаватись на резонатори. Резонансна частота одного резонатора буде зменшуватися під дією стискаючої сили, а резонансна частота іншого резонатора зростатиме під дією сили розтягування. Величина вхідного прискорення буде розрахована з різниці між резонансними частотами двох резонаторів.

Шляхом спрощення відповідної теоретичної формули [3] частотні вихідні сигнали резонаторів диференційного резонансного акселерометра мають вигляд:

$$f = f_0\sqrt{1 \pm F\frac{0.2\ \ l^2}{Ehw^3}}; \tag{2.10}$$

де

$$f_0 = \frac{2\ .3}{2\pi}\sqrt{\frac{E}{l^4\rho}}, \tag{2.11}$$

де F — величина осьової сили, $F=Ma$ є прискорення, M є маса пробної маси, f_0 — ненавантажена резонансна частота резонатора, E — модуль пружності, h — товщина резонансної балки, l — довжина резонансної балки, w — ширина резонансний балки, I – момент інерції поперечного перерізу балки.

Диференціальний вихід акселерометра задається таким чином:

$$\Delta f = f_0\left(\sqrt{1 + F\frac{0.2\ \ l^2}{Ehw^3}} - \sqrt{1 - F\frac{0.2\ \ l^2}{Ehw^3}}\right). \tag{2.12}$$

Розклад Тейлора виконується за рівнянням (2.10) без старших членів; таким чином:

$$\Delta f = f_0 F\frac{0.2\ \ l^2}{Ehw^3}. \tag{2.13}$$

Рівняння (2.13) показує, що диференціальний вихід, прийнятий у загальній конструкції акселерометра, може забезпечити такі переваги:

- Оскільки частота биття Δf значно нижча за резонансну частоту без навантаження f_0, зсув акселерометра значно зменшується.
- Масштабний коефіцієнт вдвічі більший, ніж у одного резонатора.
- Член a^2 частоти биття дорівнює нулю (a є вхідним прискоренням), що значно зменшує нелінійність.
- Вплив синфазних похибок, таких як температура та напруга, на вихід послаблюється.

ДІДК служать резонаторами в диференційному резонансному акселерометрі. Коли є введення прискорення, осьова сила на резонансній балці спричинить зміни резонансної частоти. Крім того, термічний стрес, спричинений коливаннями температури навколишнього середовища, призводить до зміни резонансної частоти. Таким чином, додаткове напруження, викликане коливаннями температури навколишнього середовища, має бути зведено до мінімуму в конструкції.

2.3. Синхронізація частот у диференційному вібраційному акселерометрі

Диференціальна конфігурація тим ефективніша, чим більше схожі дві балки (тобто їх частоти дуже близькі). Як правило у цьому випадку, дві частоти перетинаються в діапазоні вимірювань і можуть призвести до певної проблеми, відомої як «синхронізація» частот. Цей ефект приводить до зони нечутливості акселерометру до малих прискорень.

Рис. 2.3 представляє залежність ризниці частот двох балок від прискорення [4].

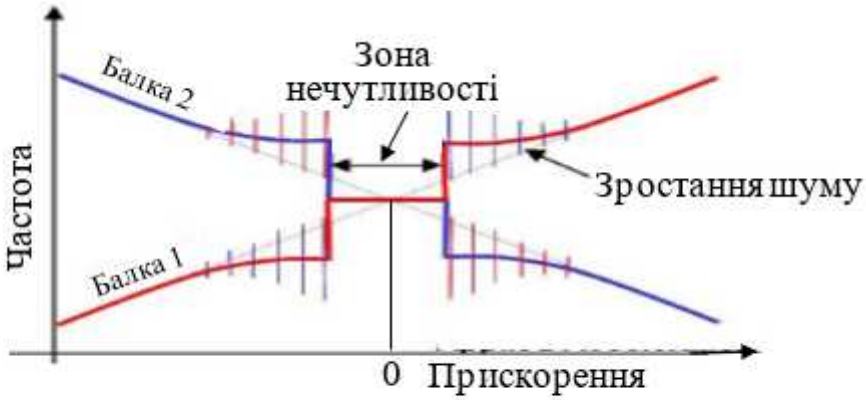


Рис. 2.3. Зона нечутливості у диференційному вібраційному

Як можна бачити з рис. 2.3 за межами зони нечутливості, або поблизу неї шуми у вихідному сигналі акселерометра зростає. Таким чином, треба щоб початкове рознесення частот двох балок було значно більше зони нечутливості. Груба оцінка зони нечутливості можна представити наступним співвідношенням:

$$\Delta f_s \approx \frac{1}{2} f_0 \frac{M}{m}, \quad (2.14)$$

де M є маса пробної маси, m є маса вібруючий балки.

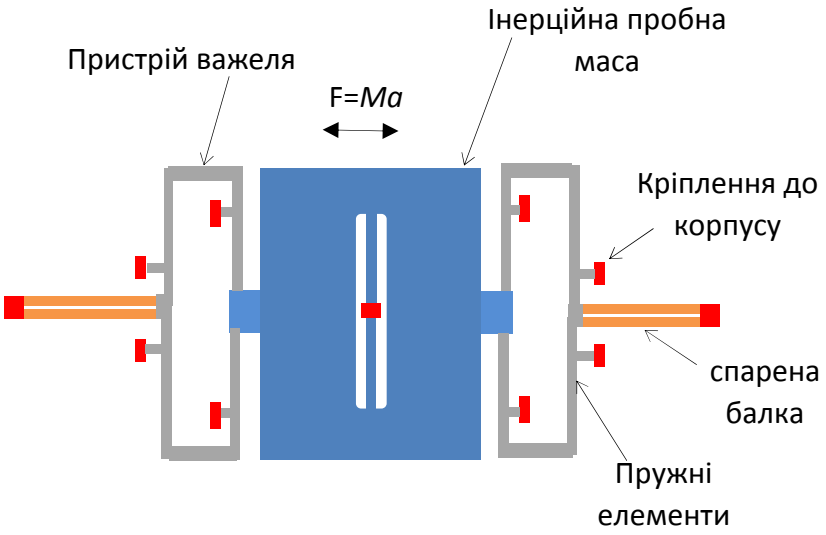
Для практичних конструкцій $\Delta f_{sync} \sim 0.1 f_0$.

Розділ 3

Вибір параметрів резонансних балок для забезпечення завданої чутливості та діапазону вимірювання акселерометра

3.1. Конструкція диференційного вібраційного акселерометра та розрахункові співвідношення

Ескізний рисунок конструкції акселерометра, для розрахунку параметрів, що забезпечують уникнення зони нечутливості та можливості вимірювання у завданому діапазоні прискорення, представлена на рис. 3.1.



Резонансна частота лівої балки коли дує навантаження *F=Ma*, як слідує з (2.10), дорівнює:

$$f_l = f_0 \sqrt{1 - F\frac{0.2\quad l_1^2}{E_1\, h_1 w_1^3}}; \quad f_0 = \frac{2\ .3}{2\pi}\sqrt{\frac{E_1 I_1}{l_1^4 \rho_1 A_1}} \qquad (3.1)$$

Резонансна частота правої балки дорівнює:

$$f_r = f_0 \sqrt{1 + F\frac{0.2\quad l_2^2}{E_2\, h_2 w_2^3}};\ f_0 = \frac{2\ .3}{2\pi}\sqrt{\frac{E_2 I_2}{l_2^4 \rho_2 A_2}} \qquad (3.2)$$

Різниця частот лівої та правої балок, після розкладу у ряд Тейлора та відкидання членів більше за перший порядок, дорівнює:

$$\Delta f = f_r - f_l = \frac{2}{2\pi}\left(\sqrt{\frac{E_2 I_2}{l_2^4 \rho_2 A_2}} - \sqrt{\frac{E_1 I_1}{l_1^4 \rho_1 A_1}}\right) +$$

$$\frac{2}{2\pi}\left(\sqrt{\frac{E_2 I_2}{l_2^4 \rho_2 A_2}}\frac{0.1}{E_2}\frac{l_2^2}{h_2 w_2^3} + \sqrt{\frac{E_1 I_1}{l_1^4 \rho_1 A_1}}\frac{0.1}{E_1}\frac{l_1^2}{h_1 w_1^3}\right) R \cdot M \cdot a\,; \qquad (3.3)$$

Зважаючи на те, що балки виготовляються з одного матеріалу, а також, що вони мають квадратний перетин, напишемо наступні рівності:

$$E_1=E_2;\ \rho_1=\rho_2;\ h_{1,2}=w_{1,2};\ A_1=h_1^2\ ;\ A_2=h_2^2\ ;\ I_{1,2} = \frac{h_{1,2}^4}{1}\,. \qquad (3.4)$$

Тепер можна переписати (3.3) наступним чином:

$$\Delta f = \Delta f_0 + \text{МК} \cdot a, \qquad (3.5)$$

де

$$\Delta f_0 = \frac{2}{2\pi}\left(\sqrt{\frac{E h_2^2}{1}\frac{}{l_2^4 \rho}} - \sqrt{\frac{E h_1^2}{1}\frac{}{l_1^4 \rho}}\right);$$

$$M = \frac{2}{2\pi}\left(\sqrt{\frac{E h_2^2}{1}\frac{}{l_2^4 \rho}} \cdot \frac{0.1}{E}\frac{l_2^2}{h_2^4} + \sqrt{\frac{E h_1^2}{1}\frac{}{l_1^4 \rho}} \cdot \frac{0.1}{E}\frac{l_1^2}{h_1^4}\right) \cdot M \cdot R;$$

$$f_0 = \frac{2}{2\pi}\sqrt{\frac{E h_2^2}{1}\frac{}{l_2^4 \rho}};\ \ f_0 = \frac{2}{2\pi}\sqrt{\frac{E h_1^2}{1}\frac{}{l_1^4 \rho}},$$

R є коефіцієнт підсилення сили *F* важелем.

```
% Вхідні дані
l1=[10 20 30 40 50]; %mm довжина лівої балки
l2=[50 40 30 20 10]; %mm довжина правої балки
h1=[0.1 0.2 0.3 0.4 0.5]; %mm; товщина лівої балки
h2=[0.5 0.4 0.3 0.2 0.1]; %mm; товщина правої балки
R=32; % коефіцієнт підсилення важеля
M=25.4; % гр. Маса пробної маси
p=8*10^-3; % г/мм^3 п плотность матеріала (сталь)
E=2*10^5 ; % Н/мм2 Модуль Юнга матеріала

% Обчислення delta_f0

delta_f0 = (22.3/2*pi)*(( (E.*h2.^2)./(12.*l2.^4.*p) ).^0.5 -
((E.*h1.^2)./(12.*l1.^4.*p )).^0.5 )

% Обчислення MK
MK = (22.3/2*pi) * (((E.*h2.^2)./(12.*l2.^4.*p)).^0.5 .*
((0.147.*l2.^2)./(E.*h2.^4)) + ((E.*h1.^2)./(12.*l1.^4.*p)).^0.5 .*
((0.147.*l1.^2)./(E.*h1.^4))) .* M .*R

% Обчислення f01
f01 = (22.3/2*pi) * ((E.*h2.^2)./(12.*l2.^4.*p)).^0.5

% Обчислення f02
```

```
f02 = (22.3/2*pi) * ((E.*h1.^2)./(12.*l1.^4.*p)).^0.5


% Побудова тривимірного графіка залежності f01 від (l1, h1)
figure(1)
plot3(l1, h1, f01, 'b-o', 'LineWidth', 1.5)
xlabel('l1 (mm)')
ylabel('h1 (mm)')
zlabel('f01 (Гц)')
title('Залежність f01 від l1 та h1')
grid on


% Побудова тривимірного графіка залежності f02 від (l2, h2)
figure(2)
plot3(l2, h2, f02, 'r-o', 'LineWidth', 1.5)
xlabel('l2 (mm)')
ylabel('h2 (mm)')
zlabel('f02 (Гц)')
title('Залежність f02 від l2 та h2')
grid on

% Побудова тривимірного графіка залежності delta_f0 від (l2, l1)
figure(3)
plot3(l2, l1, delta_f0, 'g-o', 'LineWidth', 1.5)
xlabel('l2 (mm)')
```

```
ylabel('l1 (mm)')
zlabel('delta f0 (Гц)')
title('Залежність delta f0 від l2 та l1')
grid on

% Побудова тривимірного графіка залежності delta_f0 від (h2, h1)
figure(4)
plot3(h1, h2, delta_f0, 'm-o', 'LineWidth', 1.5)
xlabel('h1 (mm)')
ylabel('h2 (mm)')
zlabel('delta f0 (Гц)')
title('Залежність delta f0 від h1 та h2')
grid on

% Побудова тривимірного графіка
figure(5)
plot3(l2, l1, MK, 'b-o', 'LineWidth', 1.5)
xlabel('l2 (mm)')
ylabel('l1 (mm)')
zlabel('MK (Гц/g)')
title('Залежність MK від l2 та l1')
grid on

% Побудова тривимірного графіка
figure(6)
plot3(h2, h1, MK, 'r-o', 'LineWidth', 1.5)
```

```
xlabel('h2 (mm)')
ylabel('h1 (mm)')
zlabel('МК (Гц/g)')
title('Залежність МК від h2 та h1')
grid on

% Знаходження мінімального значення між f01 і f02
min_f01_f02 = min(min(f01), min(f02))

% Знаходження індексів, де delta_f0 > min(f01, f02)
index = find(delta_f0 > min_f01_f02)

% Виведення інтервалів значень l1, l2, h1 і h2, де delta_f0 > min(f01, f02)
%Інтервал значень l1, де delta_f0 > min(f01, f02):
l1_interval = l1(index)
%Інтервал значень l2, де delta_f0 > min(f01, f02):
l2_interval = l2(index)
%Інтервал значень h1, де delta_f0 > min(f01, f02):
h1_interval = h1(index)
%Інтервал значень h2, де delta_f0 > min(f01, f02):
h2_interval = h2(index)

% Знаходження індексів, де МК > 50
indices = find(МК > 50)
indices = [min(indices) max(indices)]
if isempty(indices)
```

```
    disp("інтервалів значень де MK > 50 не уснує")

else
    index = indices
    % Інтервал значень l1, MK > 50:
    l1_MK_interval = l1(indices)
    % Інтервал значень l2, MK > 50:
    l2_MK_interval = l2(indices)
    % Інтервал значень h1, де MK > 50:
    h1_MK_interval = h1(indices)
    % Інтервал значень h2, де MK > 50:
    h2_MK_interval = h2(indices)
end
```

Наступний код виконує розрахунок резонансних частотот лівої та правої балок акселерометра, обчислює параметр підсилення сигналу, різницю між резонансними частотами, будує відповідні графікт залежності, а також додаткові обчислення, виводячи інтервали значень l1, l2 та h1, h2:

1. Обчислення f01:Використовуються вхідні дані h2 та l2, а також матеріальні властивості (плотність p та модуль Юнга E). Формула обчислює ненавантажену резонансну частоту лівої балки. Результат зберігається в змінну f01.

2. Обчислення f02: Використовуються вхідні дані h1 та l1, а також матеріальні властивості (плотність p та модуль Юнга E). Формула обчислює ненавантажену резонансну частоту правої балки. Результат зберігається в змінну f02.

3. Обчислення delta_f0: Формула обчислює різницю між ненавантаженими резонансними частотами лівої та правої балок акселерометра. Формула для delta_f0 враховує геометричні параметри балок та модуль Юнга матеріалу, і вона вимірює різницю в резонансних частотах, що виникає внаслідок цих параметрів. Це важливий показник, який може використовуватись для аналізу та налаштування акселерометра, а також для забезпечення бажаного діапазону вимірювання прискорення.

4. Обчислення МК: Використовуються вхідні дані h1, h2, l1 та l2, матеріальні властивості, а також параметри маси M та коефіцієнта підсилення важеля R. Формула для МК складається з двох доданків, обчислених для лівої та правої балок, обидва доданки множаться на масу M та коефіцієнт підсилення важеля R. Отже, формула МК враховує параметри балок акселерометра, їхні геометричні та фізичні властивості, а також масу пробної маси та коефіцієнт підсилення. Результат МК може використовуватись для аналізу чутливості акселерометра та визначення його вимірювального діапазону прискорення.

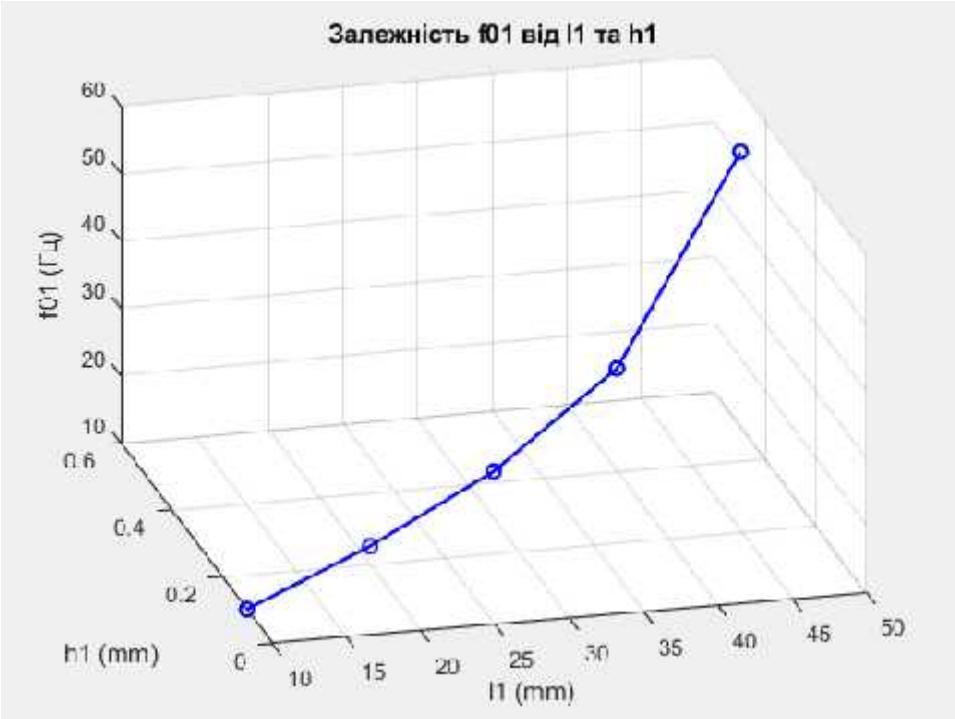


Рис. 1 Графік залежності f01 від (l1, h1)

Побудова графіка залежності f01 від l1, h1 (Рис. 1). Використовуються значення l1, h1 та f01. Графік показує залежність ненавантаженої резонансної частоти лівої балки від параметрів l1 та h1.

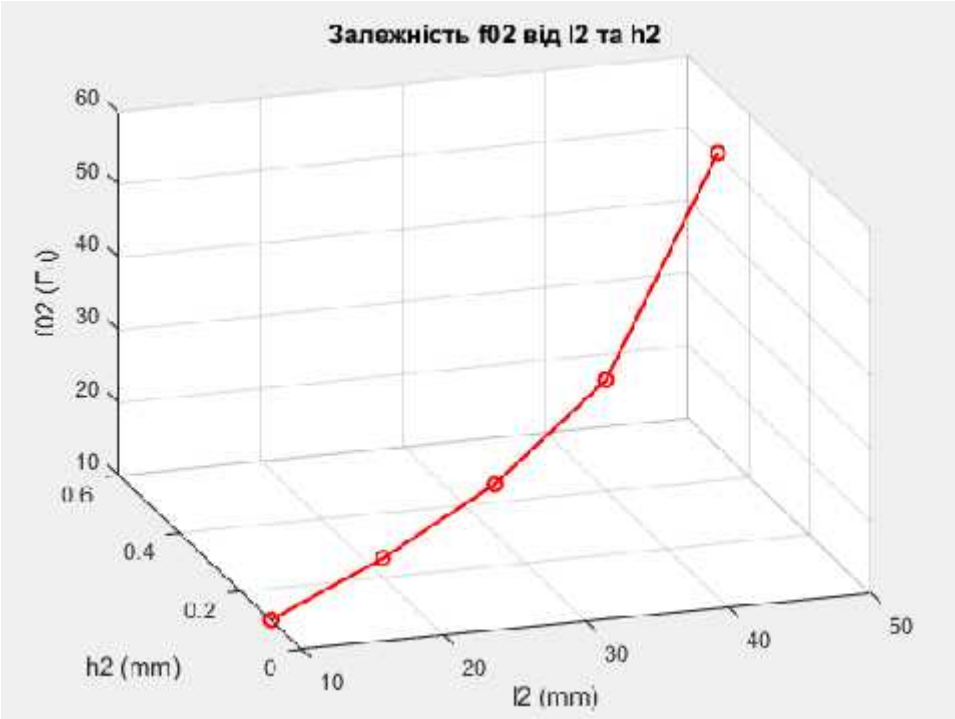


Рис. 2 Графік залежності f02 від (l2, h2)

Побудова графіка залежності f02 від l2, h2 (Рис. 2). Графік показує залежність ненавантаженої резонансної частоти правої балки від параметрів l2 та h2.

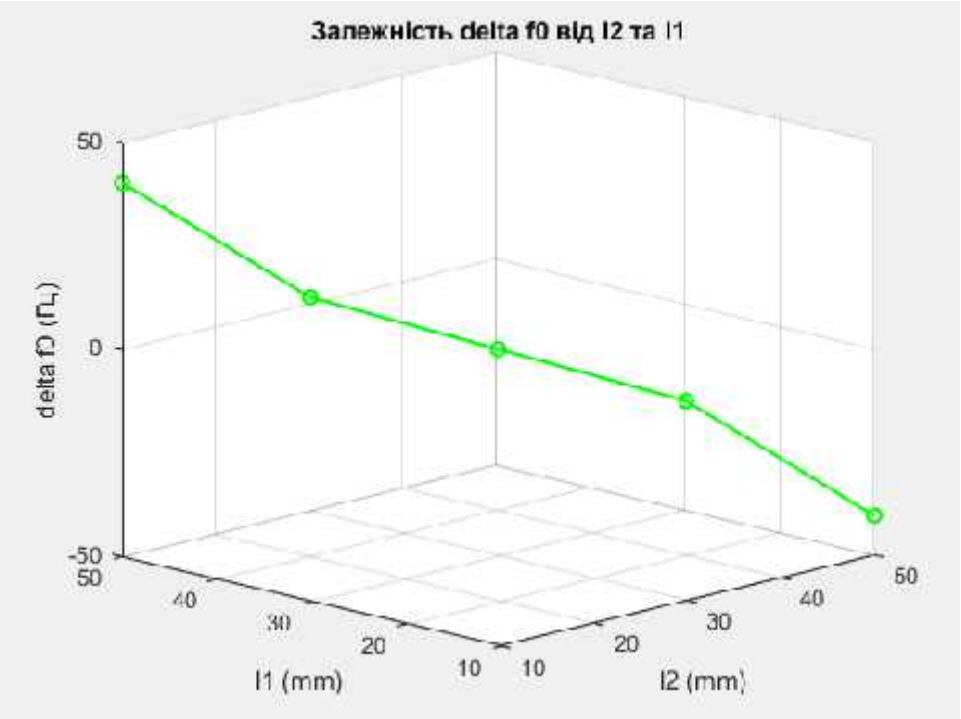


Рис. 3 Графік залежності delta_f0 від (l2, l1)

Побудова графіка залежності delta_f0 від l2, l1 (Рис. 3). Використовуються значення l2, l1 та delta_f0. Графік показує залежність різниці резонансних частот від параметрів l2 та l1.

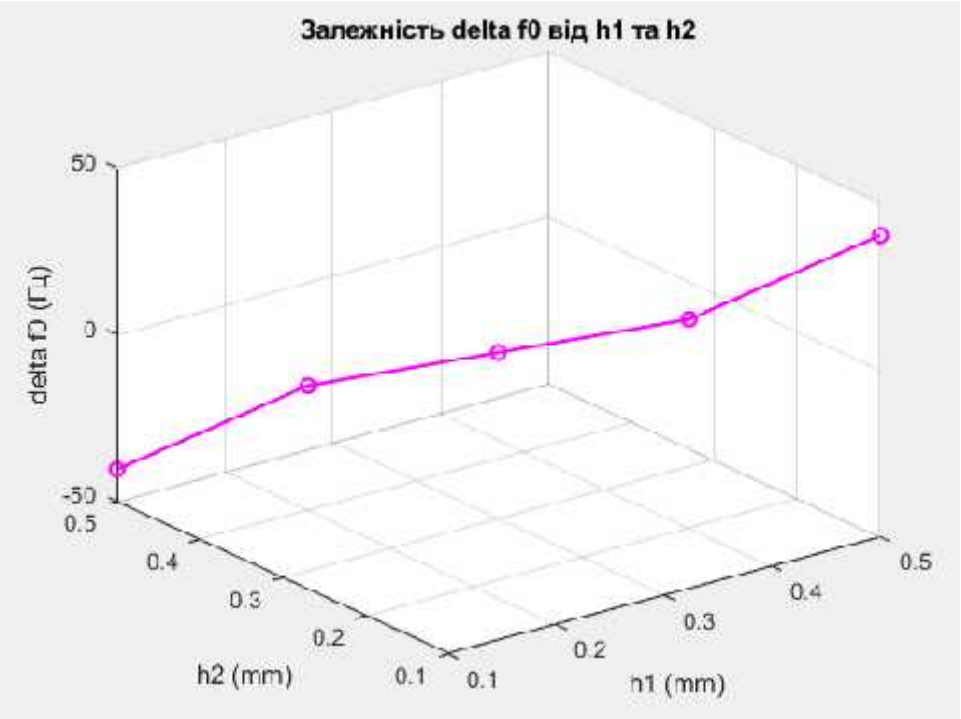


Рис. 4 Графік залежності delta_f0 від h2 та h1

Побудова графіка delta_f0 від h2 та h1 (Рис. 4). Використовуються значення h2, h1 та delta_f0. Графік показує залежність різниці резонансних частот від параметрів h2 та h1.

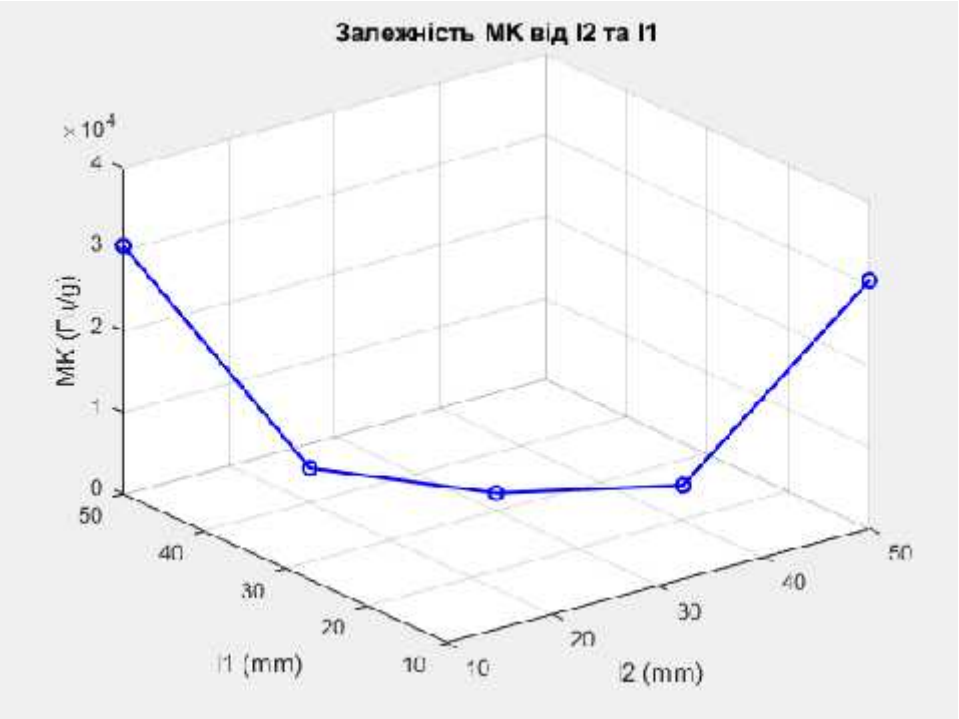


Рис. 5 Графік залежності МК від l2 та l1

Побудова графіка МК від l2 та l1 (Рис. 5). Код побудовує тривимірний графік, де вісь x відповідає значенням l2, вісь y - значенням l1, а вісь z - значенням МК. Графік демонструє залежність параметра МК від параметрів l2 та l1, дозволяючи візуально аналізувати зміну МК відносно зміни цих двох параметрів.

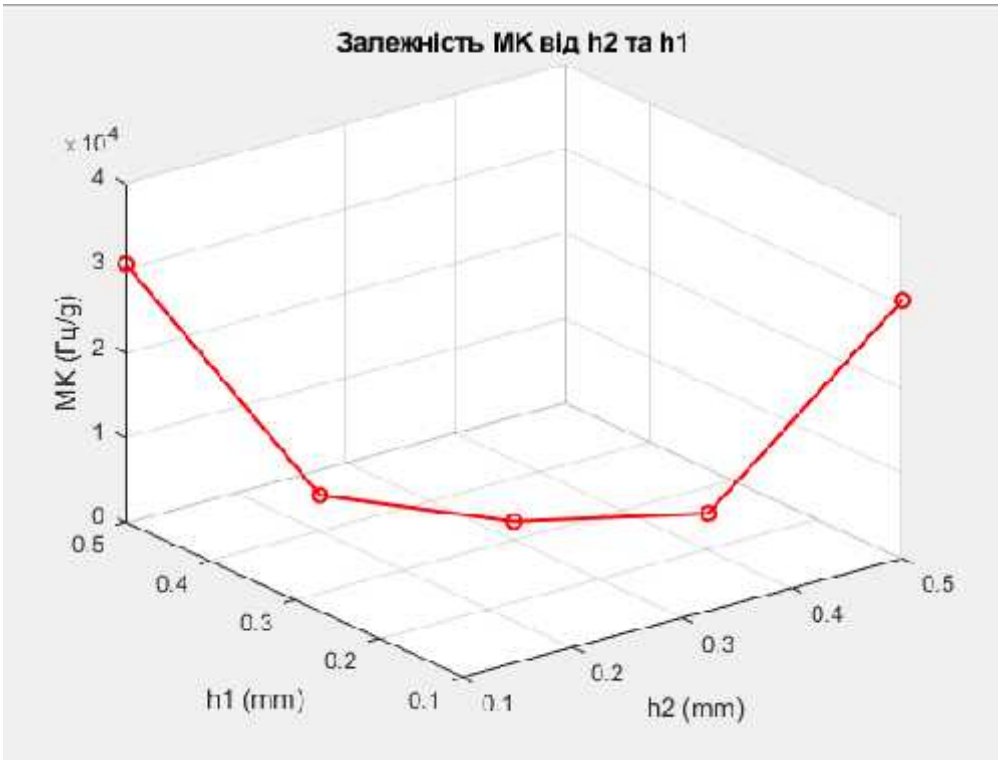


Рис. 6 Графік залежності МК від h2 та h1

Побудова графіка МК від h2 та h1 (Рис. 6). Використовуються значення h2, h1 та МК. Графік показує залежність параметра МК від параметрів h2 та h1, де вісь x відповідає значенням h2, вісь y - значенням h1, а вісь z - значенням МК.

Також код містить обчислення, які виводять інтервали значень l_1, l_2 та h_1, h_2, що задовольняють наступні умови $\Delta f > \min(f_{01}, f_{02})$ та МК > 50 Гц/g. Давайте розглянемо його по кроках:

1. min_f01_f02: Обчислюється найменше значення між f01 і f02. Результат зберігається в змінну min_f01_f02.

2. index: Знаходяться індекси, де delta_f0 більше min_f01_f02. Результат зберігається в змінну index. Виведення інтервалів значень l1, l2, h1 і

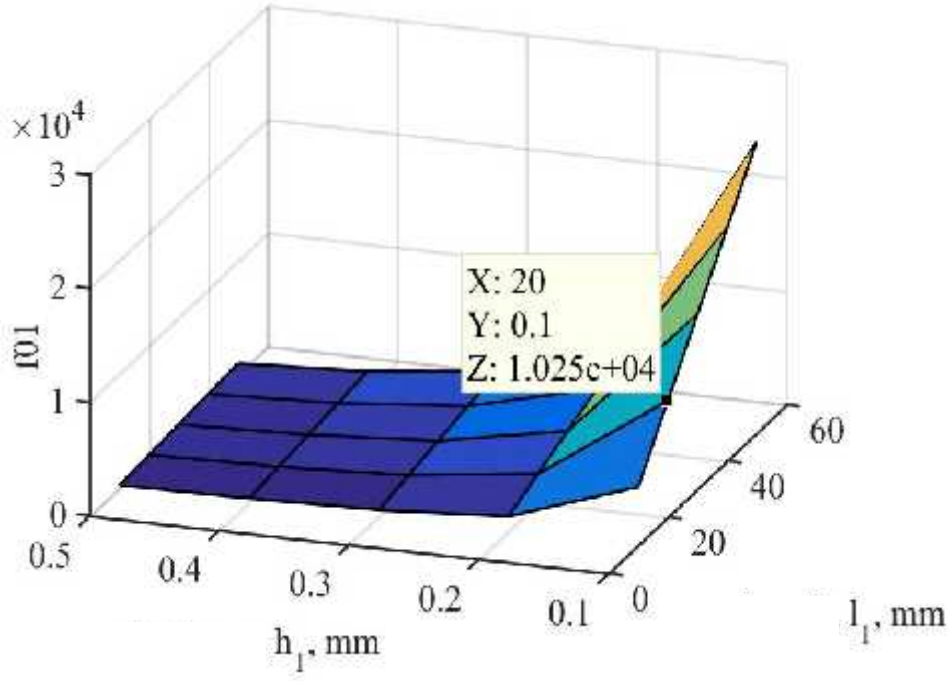
h2, де delta_f0 більше min(f01, f02): Виводяться значення l1, l2, h1 і h2, відповідні індексам, знайденим у попередньому кроці.

3. Знаходження індексів, де МК більше 50: Знаходяться індекси, де МК перевищує 50. Результат зберігається в змінну indices. Виведення інтервалів значень l1, l2, h1 і h2, де МК більше 50: Якщо indices не містить значень, виводиться повідомлення про відсутність інтервалів. Якщо indices не є порожнім, виводиться мінімальний і максимальний індекси. Виводяться значення l1, l2, h1 і h2, відповідні інтервалу індексів indices.

Цей код дозволяє візуалізувати залежності між різними параметрами акселерометра, а також обчислити значення f01, f02, delta_f0 та МК на основі вхідних даних. Графіки допоможуть зрозуміти, як зміна тих чи інших параметрів впливає на результати.

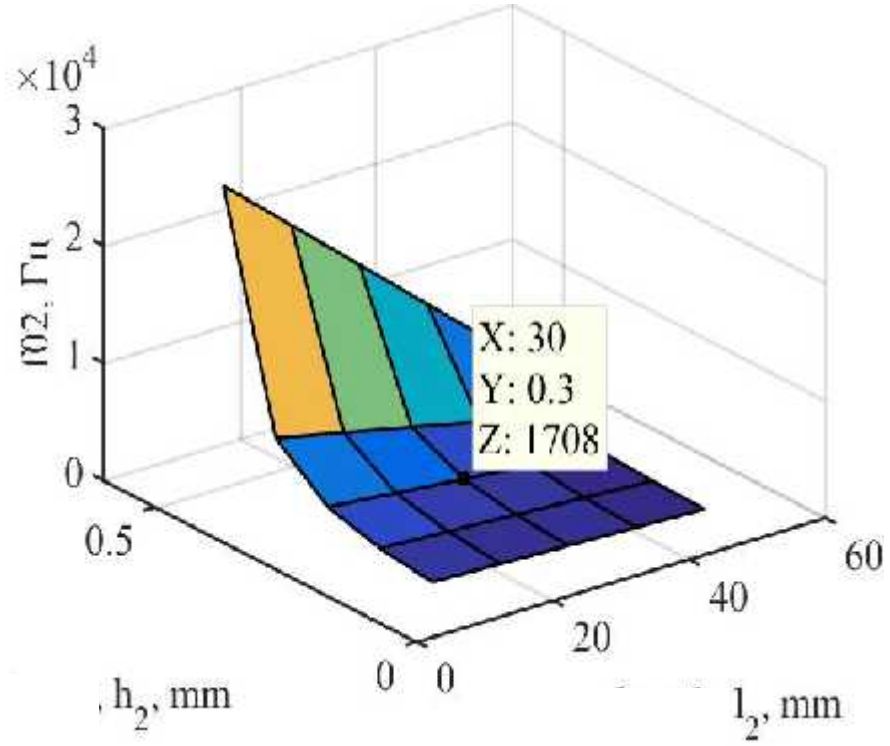
Для вибору параметрів, що задовольняють вимогам вихідних даних залежності f01, f02, МК1 та МК2 від l_1, l_2, h_1 і h_2 представимо ці залежності графічно у три-вимірному вигляди.

На рис. 3.7 представлений графік залежності резонансної частоти f_{01} лівої балки від її довжині l_1 та товщині h_1.



На графіку відмічене значення резонансної частоти, яке модна вибрати. Це значення є 10250 Гц при товщині балки 0.1 мм та довжині 20 мм.

На графіку рис. 3.8 показаний графік залежності резонансної частоти f_{02} правої балки від її довжини l_2 та товщині h_2.



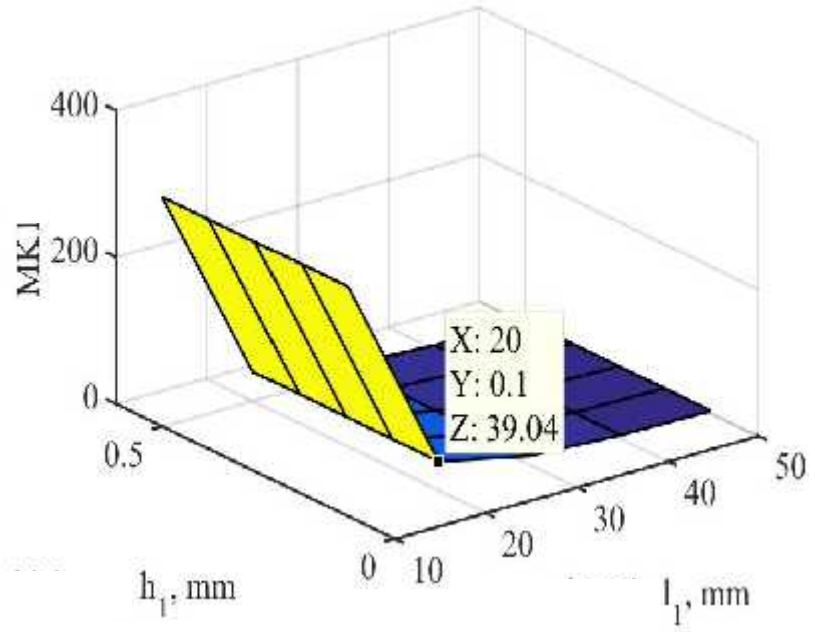
На графіку відмічене значення резонансної частоти правої балки, яке задовольняє вимогам того, що різниця частот повинна бути більше, ніж 0.1* min(f_{01}, f_{02}). Значення резонансної частоти правої балки, як слідує з рис. 3.8, при товщині 0.3 мм та довжині 30 мм дорівнює 1708 Гц. Тобто 0.1*min(f_{01}, f_{02})=170.8 Гц. При цьому різниця Δf= abs(f_{01}- f_{02})=8542 Гц >>170.8 Гц.

Таким чином, при обраних параметрів лівої та правої балок зона нечутливості до малих прискорень буде подолана. Ясно, що є множина значень параметрів, які забезпечують подолання зони нечутливості.

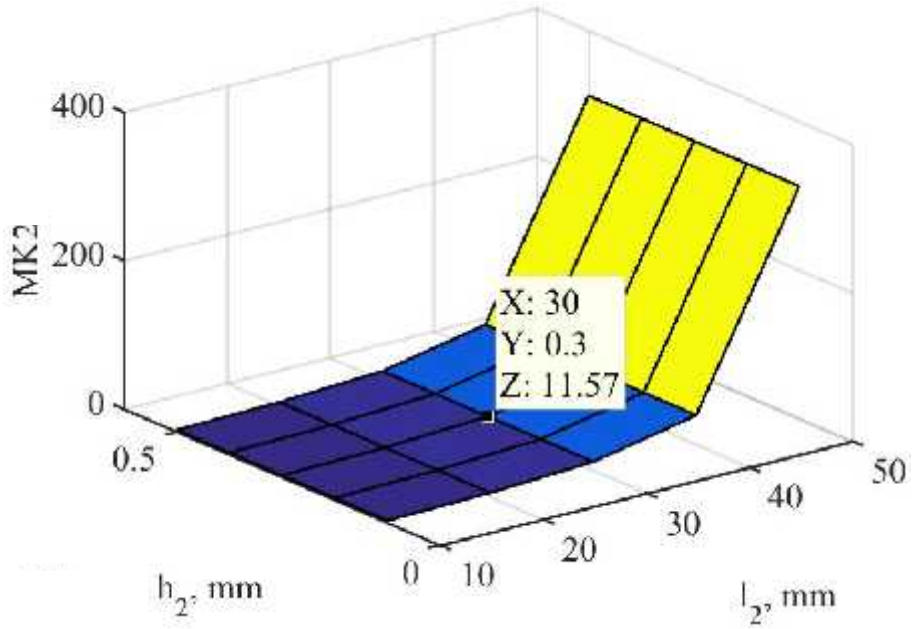
Однак, треба ще задовольнити вимогам по чутливості до прискорення, тобто масштабний коефіцієнт акселерометра повинен бути більше, ніж 50 Гц/g.

На рис. 3.9 показаний графік залежності масштабного коефіцієнту лівої балки, а на рис. 3.10 показаний графік залежності правої балки від довжини та товщини цих балок.

У точці, де резонансна частота лівої балки задовольняє вимогам, масштабний коефіцієнт дорівнює 39. 04 Гц/g.



На рис. 3.10, відмічене значення масштабного коефіцієнта правої балки, де резонансна частота балки задовольняє вимогам $\Delta f \geq 0.1 * \min(\text{abs}(f_{01} - f_{02}))$.



Це значення дорівнює МК2=11.57 Гц/g. Так як у диференційному акселерометри масштабні коефіцієнти двох балок додаються, те сумарний масштабний коефіцієнт дорівнює МК=МК1+МК2=39. 04 + 11.57=50.61 Гц/g., тобто теж задовольняє вимогам, бо вимоги для значення МК були більше 50 Гц/g.

Слід відмітити, що діапазон вимірювання прискорень визначається за формулою:

$$\Delta a = [\Delta f - 0.1 * \min(\text{abs}(f_{01} - f_{02}))]/\text{MK}. \quad (3.6)$$

Розрахунки по цей формулі дають для діапазону вимірювання $\Delta a \approx \pm 150$ g.

Висновки

1. Вібраційний диференціальний акселерометр є перспективним приладом для вимірювання прискорення.
2. Параметри вібраційного диференціального акселерометра можна обрати так, щоб задовольнити високим вимогам по чутливості, діапазону вимірювання та уникнути синхронізації частот, а тобто зони нечутливості до малих прискорень.
3. Вихідної сигнал вібраційного акселерометра є частотне-модульований, тому є перешкодо-захищений на відміну від вихідних сигналів маятникових акселерометрів.
4. Параметри вібраційного диференціального акселерометра, які були обрані у даної роботі є можливими, або не максимально досяжними.

Кафедра АКСУ				НАУ 23.23.28 ПЗ		
Розроб.	Овчар Я.В.			ВИСНОВОК	Літ.	Аркуш 69 / Аркушів 1
Керівник	Чіковані В.В.					
Консульт.					151-301-СУ	
Н.контр.	Чіковані В.В.					
Зав. кафедри	Мельник Ю.В.					

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петренко І. О., Сокол В. О. "Методи визначення параметрів диференціанального балочного акселерометра з усунною синхронізацією частот." Технічна електродинаміка. 2019. № 6. С. 34-40.
2. Мельник І. О., Шаповалов В. О., Бурячок В. О. "Аналіз технічних характеристик диференціанального балочного акселерометра з усунною синхронізацією частот." Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Технічні науки. 2020. Випуск 299. С. 104-109.
3. Лисенко О. М., Калініченко О. В., Савчук В. І. "Методи визначення параметрів диференціанального балочного акселерометра з врахуванням усунної синхронізації частот." Машинознавство. 2018. № 7. С. 57-62.
4. Бородатий В. І., Долинський В. І., Лобода О. В. "Особливості визначення параметрів диференціанального балочного акселерометра з усунною синхронізацією частот." Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2017. Випуск 55. С. 140-144.
5. Гринь І. В., Кравченко В. І., Литвиненко Л. В. "Визначення технічних характеристик диференціанального балочного акселерометра з використанням методу усунної синхронізації частот." Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2021. Том 1(95). С. 88-95.
6. Чабан В. О., Риженко Ю. П., Шелест В. В. "Аналіз методів визначення параметрів диференціанального балочного акселерометра з усунною синхронізацією частот." Наукові праці Національного гірничого університету. 2022. Випуск 1(171). С. 68-73.

Кафедра АКСУ				НАУ 23.23.28 ПЗ			
Розроб.	Овчар Я.В.			СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Керівник	Чіковані В.В.					70	1
Консульт.					151-301-СУ		
Н.контр.	Чіковані В.В.						
Зав. кафедри	Мельник Ю.В.						