

**КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний
(повна назва факультету)

Приладобудування
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ М.Д. Гераїмчук
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2019 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра
з напрямку підготовки 6.051003 Приладобудування

на тему: Датчик вібрації

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи ПІ-51
(шифр групи)

_____ Червоний Денис Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ к.т.н, доц., Дубінець В.І.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант технологічний к.т.н, професор Антонюк В.С.
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент к.т.н., доцент Шевченко В.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2019 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ*

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	ДП ПІ51. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	62	
3	A1	ДП ПІ51. 01.000 СК	П'єзоелектричний акселерометр Складальний кресленник	1	
4	A1	ДП ПІ51. 02.000	Структурна схема	1	
5	A1	ДП ПІ51. 03.000	Робочі креслення деталей	1	
6	A1	ДП ПІ51. 04.000	Графіки	1	
7	A1	ДП ПІ51. 05.000	Презентаційний аркуш	1	

				ДП ПІ51 00.000.00		
		ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Червоний Д.І.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Дубінець В.І.				1	1
Консульт.					КПІ імені Ігоря Сікорського	
Н/контр.					Каф. ПБ	
Зав.каф.	Гераїмчук М.Д.				Гр. ПІ-51	

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: Датчик вібрації

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України

**«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра Приладобудування
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Напрямок підготовки 6.051003 Приладобудування
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ М.Д.
Гераїмчук
(підпис) (ініціали, прізвище)
«__» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Червоному Денису Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: Датчик вібрації
Керівник проекту: Дубінець Владислав Іванович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від «27» травня 2019 р. №1384-с
2. Термін подання студентом проекту 10 червня 2019 р.
3. Вихідні дані до проекту Технічні характеристики п'єзоелектричного акселерометра: діапазон перетворення СКЗ віброшвидкості – 0,1...30 мм/с; діапазон робочих частот: 10...1000 Гц; діапазон робочих температур: -40...250°C; напруга живлення: 5...30В постійного тока; Нерівномірність АЧХ в діапазоні 20...750Гц; Маса датчика без кабелю: 50 г; Габаритні розміри датчика: 51x32x37 мм;
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) Проектно-конструкторський розділ: огляд методів вимірювання параметрів вібрації; проектування та розробка структурної схеми; розрахунок основних параметрів; розрахунок чутливого елементу;

розрахунок резонансних характеристик елемента; вибір конструктивних матеріалів; розрахунок параметрів інерційної маси; Технологічний розділ;

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Структурна схема – 1 арк. ф. А1; Складальний кресленик п'єзоелектричного акселерометра – 1 арк. ф. А1; Робочі кресленики деталей – 1 арк. ф. А1; Статичні та динамічні характеристики 1 арк. Ф. А1;

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічний	Антонюк В.С., професор, д.т.н.		

7. Дата видачі завдання:

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Збір теоретичної інформації	15.05.2019	
2	Проектно-конструкторський розділ	21.05.2019	
3	Розробка графічної частини проекту	28.05.2019	
4	Виконання технологічного розділу	04.06.2019	
5	Передача проекту на перевірку на виявлення збігів / схожості текстів Unichек	09.06.2019	
6	Представлення проекту на рецензію	10.06.2019	
7	Передача проекту на затвердження до завідуючого кафедрою	10.06.2019	
8	Передача електронної версії проекту до бібліотеки	11.06.2019	
9	Здача на перевірку науковому керівнику	12.06.2019	
10	Представлення проекту до екзаменаційної комісії	18.06.2019	

Студент

_____ (підпис)

Д. І. Червоний

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

_____ (підпис)

В. І. Дубінець

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

Студент: Червоний Денис Ігорович

Група: ПІ-51

Керівник: Дубінець Владислав Іванович

Анотація

Дипломний проект містить 62 аркушів, 14 ілюстрацій, 2 таблиці. У дипломному проекті розроблена конструкція п'єзоелектричного акселерометру та розраховані основні його характеристики та параметри.

Графічна частина складається із 4-х аркушів А1: структурна схема п'єзоелектричного акселерометру, складальне креслення датчика, робочі креслення деталей, статичні та динамічні характеристики.

Пояснювальна записка включає в себе:

- Технічне завдання до дипломного проекту
- Огляд основних понять вібрації та види датчиків для вимірювання вібрацій
- Проектно-конструкторський розділ, де проведено дослідження статичної, динамічної і частотних характеристик, проведено розрахунки основних елементів конструкції приладу, розроблена структурна схема датчика
- Додатки: технологічна схема складання, структурна схема складання та специфікації виробів
- Висновок та список літератури

Student: Chervonyy Denis Igorovich

Group: PI-51

Leader: Vladislav Ivanovich Dubinets

Abstract

Diploma project contains 62 sheets, 14 illustrations, 2 tables. The diploma project developed a structure of a piezoelectric accelerometer and calculated its main characteristics and parameters.

The graphic part consists of 4 sheets of format A1: a structural diagram of a piezoelectric accelerometer, assembly drawing of the sensor, working drawings of parts, static and dynamical characteristics.

The explanatory note includes:

- Terms of reference for the diploma project
- Overview of the basic concepts of vibration and types of sensors for measuring vibrations
- Structure and construction section, where static, dynamic and frequency characteristics were studied, calculations of the main elements of the device design were made, the block diagram of the sensor was developed
- Appendices: technological scheme of assembly, structural scheme of assembly and specification of products
- Conclusion and list of literature

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1. ВІБРАЦІЯ	11
1.1. Найпростіші вібрації.....	11
1.2. Вимірювання і контроль вібрацій	13
2. ДАТЧИКИ ВІБРАЦІЇ	16
2.1. Проксіметр.....	16
2.2. Велосіметр	12
3. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР	14
3.1. Види п'єзоелектричних акселерометрів.....	14
3.2. Основні характеристики.....	21
3.2.1. Полярність	21
3.2.2. Чутливість.....	22
3.3. Характеристики п'єзоелектричних акселерометрів.....	28
3.3.1 Фазова характеристика.....	28
3.3.2. Перехідна характеристика	29
4. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	31
4.1. Проектування та розробка структурної схеми.....	32
4.2. Вибір конструктивних матеріалів	34
4.2.1. П'єзоелектричні матеріали.....	34
4.2.2. Розрахунок перетворювача	35
4.3. Вплив умов навколишнього середовища	37
4.3.1. Температура.....	33
4.3.2. Вологість.....	33

					<i>ДП П151.00.00 ПЗ</i>						
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Пояснювальна записка</i>			<i>Літера</i>	<i>Аркуш.</i>	<i>Аркушів</i>	
Розроб.		<i>Червоний Д.І.</i>								7	62
Перевір.											
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		<i>Дудінець В.В.</i>			<i>НТУУ «КПІ», ПБФ</i>						

4.3.3. Деформація основи	34
4.3.4. Магнітні поля	34
4.4. Конструкція та конструктивні особливості акселерометрів	34
4.5. Розрахунок параметрів інерційної маси.	41
4.6. Розрахунок резонансних характеристик п'єзоелемента	43
4.7. Калібрування акселерометрів	41
5. ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	50
5.1. Розрахунок технологічності приладу	50
5.2. Параметрична точність складання	55
5.3. Проектування схеми ступенів складання.....	50
5.4. Проектування технологічної схеми складання	51
5.5. Проектування структурної схеми складання	51
ВИСНОВОК.....	53
ЛІТЕРАТУРА	54
ДОДАТКИ.....	62

ВСТУП

Технічна діагностика останнім часом набуває особливої актуальності у зв'язку з досягненням граничних значень ресурсних параметрів машин і устаткування. Для оцінки технічного стану значного числа промислових об'єктів і обладнання успішно застосовується вібродіагностика.

У системах вібродіагностики застосовуються первинні віброперетворювачі, якими в переважній більшості випадків є п'єзоелектричні акселерометри.

Ефективність діагностики в значній мірі визначається якістю первинної інформації, яка визначається як конструкцією первинних перетворювачів, так і режимом їх роботи, тому цілком логічно починати дослідження, спрямовані на підвищення ефективності систем вібродіагностики з підвищення ефективності первинних п'єзоелектричних перетворювачів.

Основна тенденція, що намітилася останнім часом в техніці - це мініатюризація. Крім усього іншого, це пов'язано з постійно зростаючими цінами на сировину і матеріали, а так само з перспективою зіткнутися в майбутньому з гострим дефіцитом цих матеріалів. Не дивно, що все більше і більше виробників п'єзодатчикової апаратури прагнуть впровадити виробництво малогабаритних датчиків. Від малогабаритних п'єзоакселерометрів вимагають використання як найменше п'єзокераміки, виробництво якої дороге і екологічно небезпечне.

Виходячи з усього вищесказаного впливає, що актуальність розробки малогабаритних п'єзоелектричних акселерометрів не викликає сумнівів, так само як і прагнення, при фіксованих розмірах датчика, домогтися його максимальної чутливості і інших технічних характеристик [1].

									Лист
									10
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	ДП ПІ51. 00.00 ПЗ				

1. ВІБРАЦІЯ

Самою простою вібрацією є гармонійна вібрація, це коли тіло здійснює синусоїдальні коливання. При цьому зміщення коливної точки s (вібропереміщення) в момент часу t :

$$s = s_a (\sin \omega t + \varphi), \quad (1.1)$$

або

$$s = s_a (\cos \omega t + \varphi), \quad (1.2)$$

де s_a - амплітуда зміщення;

$\omega = 2\pi f$ - кругова частота коливань;

$f = 1 / \tau$ - частота коливань;

τ - період коливань;

φ - початкова фаза коливань.

1.1. Найпростіші вібрації

Найпростіший вид вібрації - це коливання або повторюваний рух об'єкта біля положення рівноваги. Цей тип вібрації можна назвати загальною вібрацією, тому що тіло переміщається як єдине ціле і всі його частини мають однакову за величиною і напрямком швидкість. Положенням рівноваги називають такий стан, в якому тіло перебуває в стані спокою або положення яке воно займе, якщо сума діючих на нього сил дорівнює нулю. Коливальний рух твердого тіла може бути повністю описано у вигляді комбінації шести найпростіших типів руху: поступального в трьох взаємно перпендикулярних напрямках (x, y, z в декартовій системі координат) і обертального щодо

трьох взаємно перпендикулярних осей (Ox, Oy, Oz). Будь яке складне переміщення тіла можна розкласти на ці шість простих складових. Тому про такі тілах кажуть , що вони мають шість ступенів свободи. Наприклад, корабель може переміщатися в напрямку осі «корми-ніс», підніматися і опускатися вгору вниз, рухатися в напрямку осі правий борт лівий борт, а також обертатися щодо вертикальної осі і відчувати бокову і кільцеву качку [1].

Уявімо собі якийсь об'єкт, переміщення якого обмежені одним напрямком, наприклад, маятник настінного годинника. Така система називається системою з одним ступенем свободи, тому що становище маятника в будь-який момент часу може бути визначено одним параметром кутом в точці закріплення [2].

Іншим прикладом системи з одним ступенем свободи є ліфт , який може переміщатися тільки вгору і вниз уздовж стовбура шахти. Вібрація тіла завжди викликається якимись силами збудження. Ці сили можуть бути додані до об'єкта ззовні або виникати всередині нього самого. Далі ми побачимо , що вібрація конкретного об'єкта повністю визначається силою збудження, її напрямком і частотою. Саме з цієї причини вібраційний аналіз дозволяє виявити сили збудження при роботі машини. Ці сили залежать від стану машини , знання їх характеристик і законів взаємодії дозволяє діагностувати вади останньої [3].

1.2. Вимірювання і контроль вібрацій

Вимірювання і контроль вібрацій необхідні в багатьох областях промисловості: в мікроелектроніці, машинобудуванні, енергетиці, авіабудуванні, на залізничному транспорті і т. д. Для того щоб задовольняти основним сучасним вимогам вимірювань вібрацій, пристрої повинні забезпечувати безконтактний спосіб, високий дозвіл вимірювань зміщення поверхні (10 ... 100 нм), як найбільшу робочу відстань до об'єкта (виніс на кілька метрів), можливість роботи з високочастотними вібраціями поверхні об'єкта (10³ ... 10⁴ Гц) [1].

У безпілотних літальних апаратах і повітряних судах за допомогою інерціальної навігаційної системи здійснюється замір і обчислення навігаційних параметрів і надається інформація для екіпажу і різних електронних систем. При цьому в системах автоматичного керування траєкторією польоту, контролю та управління двигунами літальних апаратів широко використовуються сигнали акселерометрів. Так, наприклад, для вимірювання лінійного прискорення літального апарату використовуються параметричні перетворювачі, а для вимірювань вібрацій двигунів застосовуються - генераторні перетворювачі. Існуючі акселерометри, в залежності від розв'язуваної задачі, вимірюють тільки лінійне, кутове прискорення або вібрацію. Тут, зменшення маси та габаритних показників, збільшення ефективності та інформативності вимірювань є одним із пріоритетних завдань приладобудування [2].

Найпростішими з існуючих в природі коливання є пружні прямолінійні коливання тіла на пружині (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 - Приклад простого коливання

Така механічна система володіє одним ступенем свободи. Якщо відвести тіло на деяку відстань від положення рівноваги і відпустити, то пружина поверне його(тіло) в точку рівноваги. Однак тіло здобуде при цьому певну кінетичну енергію, проскочить точку рівноваги і деформує пружину в протилежному напрямку. Після цього швидкість тіла почне зменшуватися, поки воно не зупиниться в іншій крайній позиції, звідки стиснена або розтягнута пружина знову почне повертати тіло назад в положення рівноваги. Такий процес буде повторюватися знову і знову, при цьому відбувається безперервне перетікання енергії від тіла (кінетична енергія) до пружини (потенційна енергія) і назад [4].

На рис.1.1 представлений також графік залежності переміщення тіла від часу. Якби в системі було відсутнє тертя, то ці коливання тривали б безперервно і нескінченно довго з постійними амплітудою і частотою. У реальних механічних системах такі ідеальні гармонійні системи руху не зустрічаються. Будь-яка реальна система має силу тертя, яка призводить до поступового згасання амплітуди і перетворює енергію коливань в тепло [3].

Найпростіше гармонійне переміщення описується наступними параметрами:

T - період коливань,

F - частота коливань, $1 / T$.

Період - це інтервал часу, який необхідний для завершення одного циклу коливання, тобто це час між двома послідовними моментами перетинання нульової точки в одному напрямку. Залежно від швидкості коливань, період вимірюють в секундах або мілісекундах.

Частота коливань - величина зворотна до періоду, визначає кількість циклів коливання за період, вона вимірюється в герцах ($1 \text{ Гц} = 1/\text{секунду}$). Коли розглядаються обертові машини, то частота основного коливання відповідає частоті обертання, яка вимірюється в об/хв ($1/\text{хв}$) і визначається як:

$$\omega = F \cdot 60 \quad (1.3)$$

де F- частота в Гц, помножена на 1 хв (60 секунд) [5].

2. ДАТЧИКИ ВІБРАЦІЇ

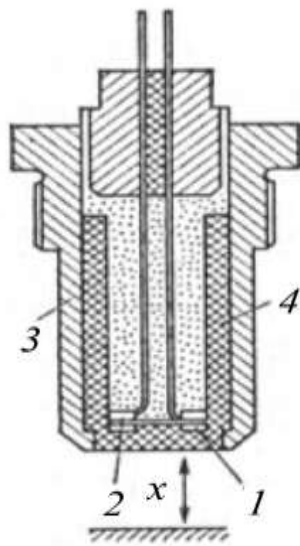
Вібраційний датчик - пристрій, що генерує електричний сигнал, пропорційний вимірюваному параметру вібраційного процесу. При вимірюванні параметрів вібрації використовуються датчики: проксиметри - для вимірювання вібропереміщення; велосиметри - для вимірювання віброшвидкості; акселерометри генеруючі сигнал, пропорційний віброприскоренню [2].

2.1. Проксиметр

Проксиметр (датчик переміщення) - стаціонарно встановлений пристрій, що має підсилювач сигналів і генерує напругу на виході, пропорційну відстані до обертового ротора. Датчик (вихрострумний) безконтактно вимірює відносне переміщення вала в межах зазору підшипника.

При коливаннях зазору між ротором і датчиком, закріпленому на опорі, змінюються частота або амплітуда електромагнітних параметрів, пропорційних частоті і значенням амплітуди зазору.

Для вимірювання радіальної вібрації, датчики встановлюють парами під кутом 90° перпендикулярно валу. Це робить можливим візуалізацію на екрані осцилографа орбіти руху вала. Проксиметр приведений на рис. 2.1.



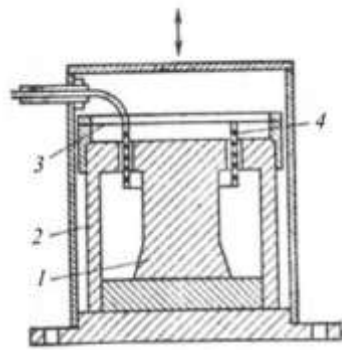
Вихрострумний перетворювач відносного переміщення. 1-робоча котушка; 2-котушка температурної компенсації; 3-корпус; 4-ізоляційна втулка

Рисунок 2.1 - Проксіметр

2.2. Велосіметр

Велосіметри (вимірювачі віброшвидкості) складаються з котушки індуктивності і магніту. Відносний рух магнітного поля в котушці породжує ЕРС індукції, сила якої пропорційна швидкості руху. Мають більший вихідний сигнал, застосування обмежується частотою 2000 Гц. Конструктивно датчик виконаний у вигляді циліндричного корпусу, в якому розташована котушка індуктивності в пружному підвісі, всередині якої розташований магніт. При коливаннях корпусу датчика котушка індуктивності починає коливатися під дією сили інерції, перетинаючи магнітне поле, при цьому в котушці виникає ЕРС, амплітуда і частота якої пропорційні швидкості і частоті коливань корпусу датчика, прикріпленого до досліджуваної поверхні. Приклад велосіметра наведений на рис.2.2 [4].

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Електродинамічний перетворювач відносного переміщення. 1 - магніт; 2 - магнітопровід; 3 - розрізні пружини; 4 - котушка у ролі інерційного елемента

Рисунок 2.2 - Велосіметр

Изм	Лист	№ докум	Підпись	Дата

ДП ПІ51. 00.00 ПЗ

Лист

18

3. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

3.1. Види п'єзоелектричних акселерометрів

П'єзоелектричні акселерометри - найбільш універсальні і часто використовувані датчики.

Найпоширеніші конструкції п'єзоелектричних акселерометрів:

- акселерометри стиснення: маса впливає силою стиснення на п'єзоелектричний елемент (рис. 3.1);
- акселерометри зрушення: робота пьезоелемента під дією зрізуючих зусилля (рис. 3.2).

Акселерометр є перетворювачем механічних коливань в електричний сигнал пропорційний віброприскоренню.

Чутливий елемент акселерометра складається з одного або декількох дисків або пластинок з п'єзоелектричних матеріалів. Дія п'єзоелектричного вимірювального перетворювача ґрунтується на використанні прямого п'єзоєфекту, тобто властивостей деяких матеріалів генерувати заряд, під дією прикладеної о них механічної сили.

Над чутливим елементом встановлена інерційна маса, притиснута гайкою (жорсткою пружиною).

Під впливом механічних коливань інерційна маса m впливає на п'єзоелемент з силою F , пропорційною прискоренню a : $F = m \times a$. В результаті п'єзоелектричного ефекту на поверхні пьезоелемента виникає електричний сигнал U пропорційний силі F і прискоренню a механічних коливань [5].

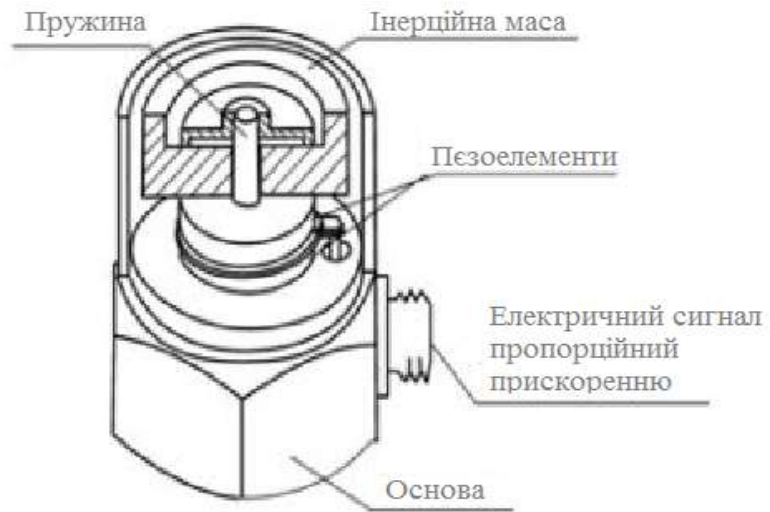


Рисунок 3.1 - Пізoeлектричний акселерометр із елементом стиснення

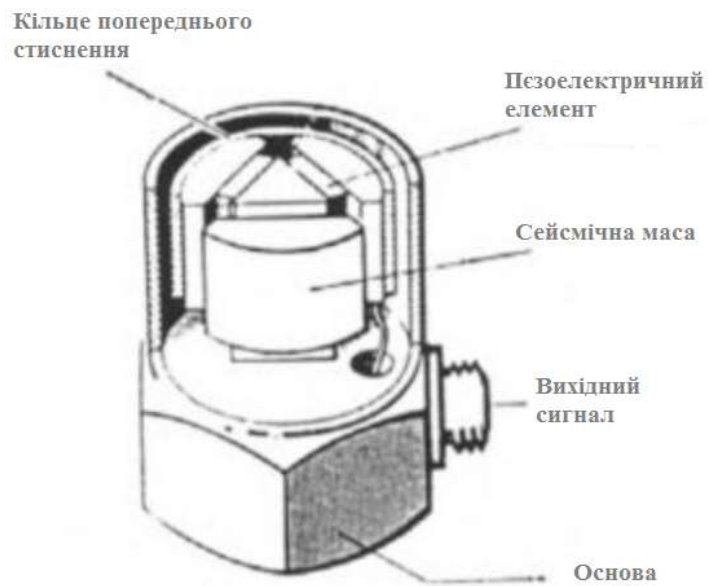


Рисунок 3.2 - Пізoeлектричний акселерометр із зсувним елементом

Ізм	Лист	№ докум	Підпись	Дата

Акселерометри мають лінійну амплітудну чутливість в робочому діапазоні, стабільно працюють тривалий час, потребують періодичного калібрування.

Активний елемент складається з п'єзоелектричних дисків, розташованих між основою його корпусу і відносно більшою інерційною масою. Маса притиснута жорсткою пружиною. Всі згадані вище деталі розташовані всередині герметично ущільненого корпусу з нержавіючого матеріалу. При піддаванні акселерометра механічним коливанням, що впливають на його основу, інерційна маса впливає на п'єзоелектричні диски змінною силою. В результаті п'єзоелектричного ефекту, що знаходиться під впливом механічної сили пьезоелектрика утворюється електричний заряд, пропорційний діючій силі і, отже, прискоренню інерційної маси [7].

На частотах, набагато менших власної резонансної частоти акселерометра, прискорення інерційної маси рівне прискоренню цілого акселерометра. Отже, електричний заряд що генерується акселерометром пропорційний прискоренню механічних коливань, що впливають на нього [8].

3.2. Основні характеристики

3.2.1. Полярність

Полярність генеруемого акселерометром і передаваного їм на вихідне гніздо електричного сигналу визначається полярністю загальної поверхні між п'єзоелектричними елементами і реакцією інерційної маси.

3.2.2. Чутливість

Чутливість акселерометра визначається співвідношенням генеруємого і віддаваного їм на відповідне гніздо електричного сигналу до прискорення впливаючих на нього механічних коливань.

3.2.2.1. Чутливість по заряду і напрузі

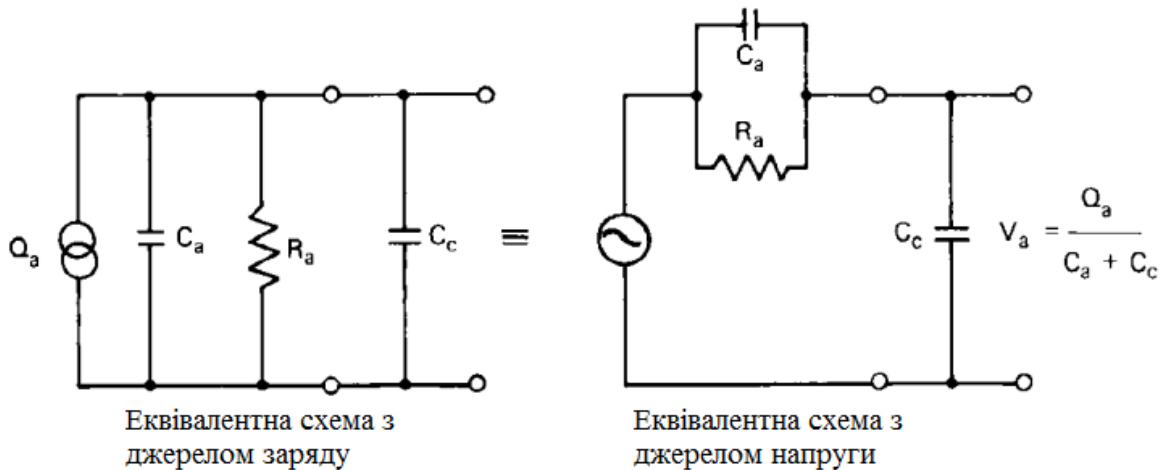


Рисунок 3.3 - Еквівалентна електрична схема п'єзоелектричного акселерометра і з'єднувальним кабелем

П'єзоелектричний елемент акселерометра можна уявити як паралельно з'єднані конденсатор ємністю C_a і резистор з таким опором, що на практиці їм можна знехтувати. Отже, його можна розглядати або як джерело заряду Q_a з паралельно з'єднаним конденсатором C_a , або як джерело напруги I_a з конденсатором C_a в послідовному з'єднанні рис 3.3.

З цього випливає, що чутливість акселерометра можна виразити і калібрувати в одиницях електричного заряду на одиницю прискорення механічних коливань.

$$S_{qa} = \frac{nКл}{мс^{-2}} = \frac{nКл_{СКЗ}}{мс^{-2}_{СКЗ}} = \frac{nКл_{пик}}{мс^{-2}_{пик}}$$

Або в одиницях електричної напруги на одиницю прискорення механічних коливань

$$S_{va} = \frac{mB}{mC^{-2}} = \frac{mB_{СКЗ}}{mC^{-2}_{СКЗ}} = \frac{mB_{пик}}{mC^{-2}_{пик}}$$

З наведених на рис. 3.3 спрощених еквівалентних електричних схем слідує, що вихідна напруга $V_a = Q_a / (C_a + C_0)$ залежить від ємності з'єднувального кабелю, в той час як вихідний заряд від ємності з'єднувального кабелю не залежить. Отже, дані заводського калібрування чутливості по напрузі окремих акселерометрів завжди відносяться до вібродатчику з поставляємим разом з ним з'єднувальним кабелем.

Якщо при застосуванні кабель відрізняється від стандартного з'єднувального кабелю, то необхідно визначити його ємність. Ємність з'єднувального кабелю потрібно відмічати у відповідному калібрувальному паспорті. В іншому випадку, необхідно зробити повторне калібрування чутливості по напрузі акселерометра разом з з'єднувальним кабелем [2, 9].

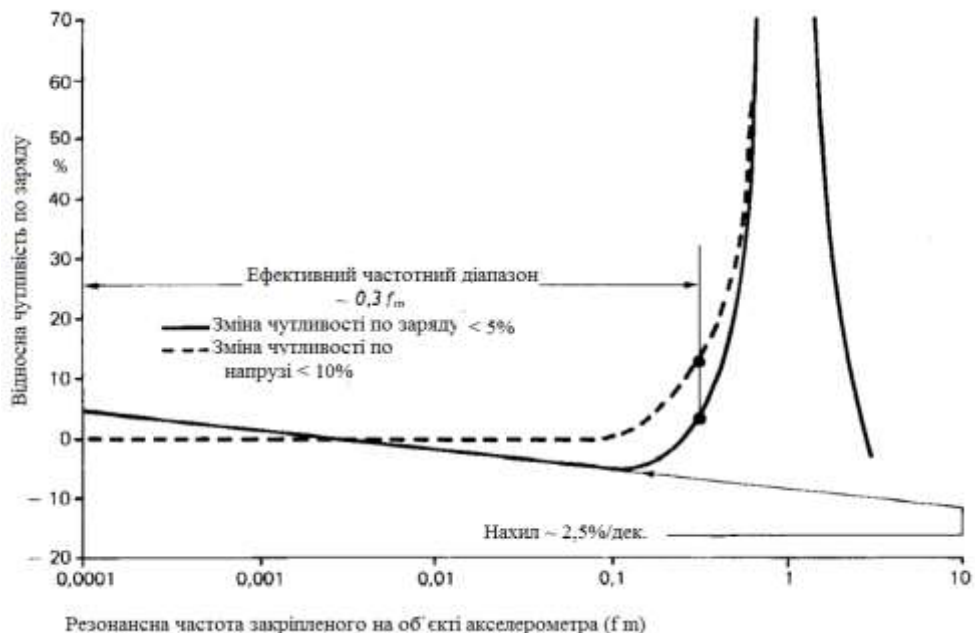


Рисунок 3.4 - Криві залежності чутливості по заряду і напрузі від частоти акселерометра з п'єзоелементом із кераміки

В області низьких і середніх частот нормального робочого частотного діапазону акселерометра його чутливість по напрузі не залежить від частоти. Це також дійсно для чутливості по заряду акселерометрів, п'єзоелемент яких виготовлений з фероелектричної кераміки і кварцевого кристала.

Однак, чутливість по заряду і ємність акселерометрів, п'єзоелемент яких виготовлений з фероелектричної кераміки, зменшуються зі збільшенням частоти. Однак, зменшення чутливості з частотою частково компенсується її зростанням в області власного резонансу акселерометрів. Отже, чутливість по заряду акселерометрів не змінюється більш ніж на $\pm 5\%$ і залишається в цих межах на всіх частотах і відповідних робочих частотних діапазонів (рис. 3.4) [10].

3.2.2.2. Нормалізована чутливість

Певні акселерометри мають нормалізовану чутливість. Застосування акселерометрів з нормалізованої чутливістю разом з відповідними підсилювачами значно полегшує і прискорює налаштування чутливості і калібрування вібровимірювальних систем. Результатом є зменшення потрібного для підготовки і настройки вимірювальної, аналізуючої і (або) реєструючої системи часу і виключення будь-яких обчислень при вимірюванні, аналізі та обробці даних. До переваг цих акселерометрів також відноситься можливість їх ефективного застосування в багатоканальних контрольних і вібровимірювальних системах.

Вплив ємності з'єднувального кабелю на чутливість по заряду акселерометрів з нормалізованої чутливістю можна знехтувати. Однак, ємність з'єднувального кабелю значно впливає на їх чутливість по напрузі

і тому з метою збереження приведених у відповідних калібрувальних паспортах значень ці акселерометри потрібно застосовувати з кабелями, які поставляються разом із ними.

3.2.2.3. Поперечна чутливість

Акселерометри чутливі не тільки до механічних коливань в напрямку їх головної осі, а в певній мірі також до коливань в перпендикулярній площині головної осі. Значення поперечної чутливості виражається у відсотках чутливості по напрузі і заряду в напрямку головної осі і приводиться в індивідуальних калібрувальних паспортах.

На рис. 3.5 видно, що поперечна чутливість акселерометра обумовлюється розбіжністю головної геометричної осі акселерометра і напрямку його максимальної чутливості по заряду і (або) напрузі. Поперечна чутливість має відмінні одне від одного значення в різних напрямках перпендикулярної площині головної осі акселерометра, причому напрямки максимальної і мінімальної поперечної чутливості розташовані перпендикулярно один одному в згаданій вище площині.

Максимальне значення поперечної чутливості акселерометра наводиться в його калібрувальному паспорті, а напрямок її мінімального значення відзначають червоною міткою на нижній грані основи акселерометра [10, 11, 12].

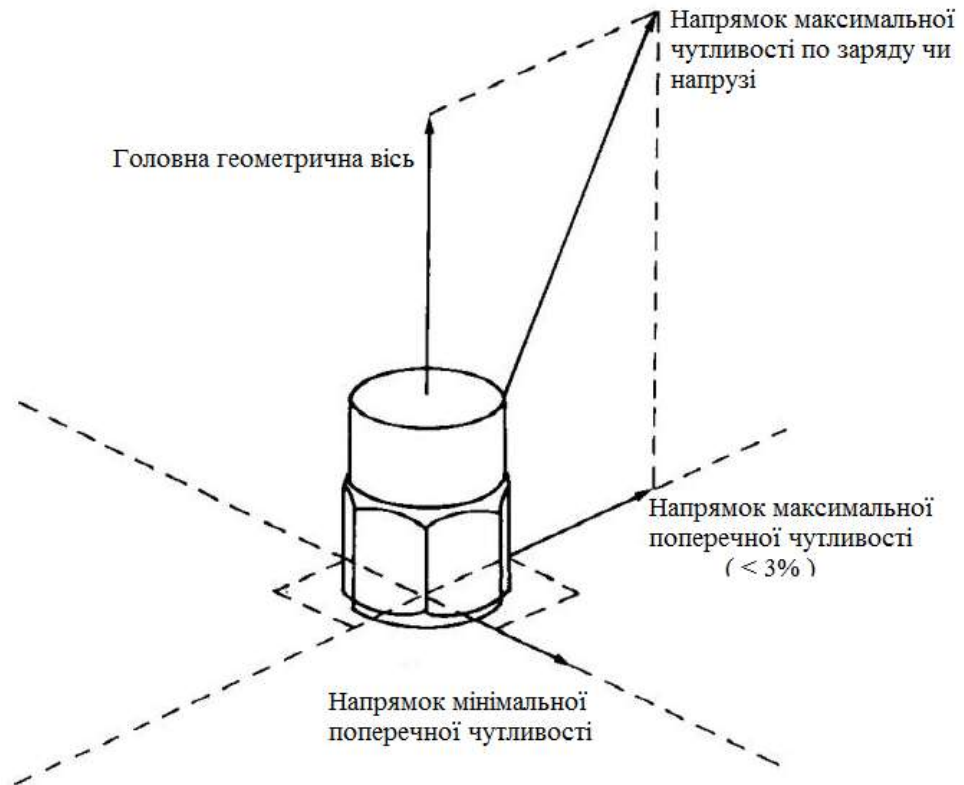


Рисунок 3.5 - Векторне представлення поперечної чутливості п'єзоелектричного акселерометра

Ідеальним вважався б акселерометр з нульовою поперечною чутливістю. Однак, невеликі неточності окремих деталей їх вивірення і присутність нечистот і поляризації п'єзоелемента виключають можливість створення акселерометрів з нульовою поперечною чутливістю.

Точне визначення значення поперечної чутливості практично неможливо на частотах поблизу $1/3$ власної резонансної частоти закріпленого на поверхні досліджуваного або випробуваного об'єкта акселерометра зважаючи, на присутній в цій області поперечного резонансу акселерометра (рис. 3.6) [5, 13].

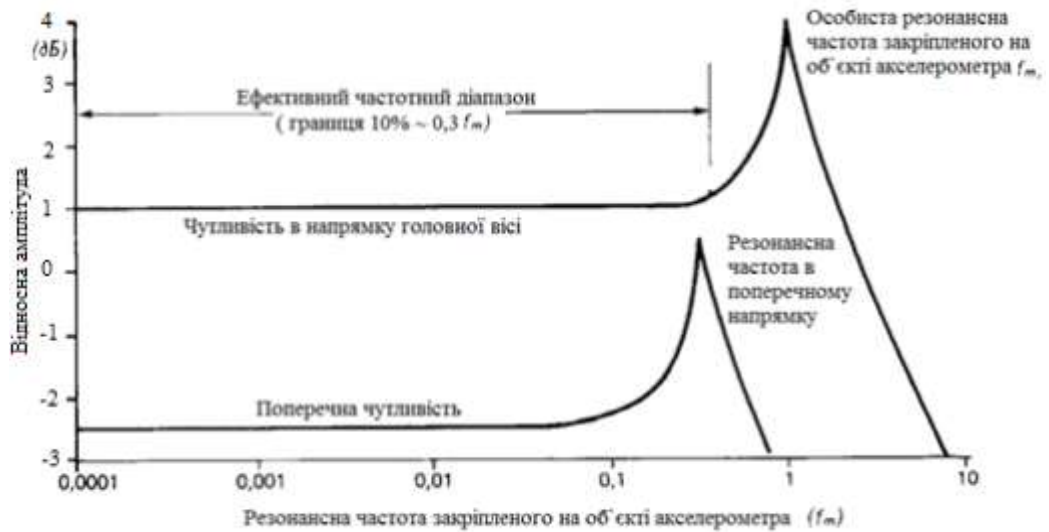


Рисунок 3.6 - Криві частотної залежності чутливості в напрямку головної осі і поперечної чутливості п'єзоелектричного акселерометра

Отже, враховуючи поперечний резонанс (резонансна частота всередині нормального робочого частотного діапазону і резонансний пік, що не проявляється на амплітудно-частотній характеристиці), в ході практичних вимірювань, аналізу та реєстрації механічних коливань завжди необхідно переконуватися в тому, що амплітуди поперечних коливань набагато менші значення максимально допустимого значення механічних коливань і ударів в напрямку головної осі акселерометра, що приводиться серед технічних даних в паспорті. З аналогічних причин слід уникати сильних механічних ударів і струсів акселерометрів (наприклад, при вільному падінні на тверду підлогу) в поперечних напрямках.

Поперечні удари і струси з великими амплітудами можуть бути навіть причиною пошкодження п'єзоелектричного елемента і, отже, виходу акселерометра з ладу [14].

3.3. Характеристики п'єзоелектричних акселерометрів

З цього графіка видно, що робочий частотний діапазон акселерометра, в якому його частотна характеристика рівномірна і лінійна, діапазон обмежений зверху його власною резонансною частотою.

3.3.1 Фазова характеристика

Обумовлюєме акселерометром зрушення фази відповідає часу затримки між впливаючими на нього механічними коливаннями і відповідним їм вихідним електричним зарядом або напругою.

Якщо час затримки динамічно змінюється з частотою, фазові і тимчасові співвідношення між окремими складовими вимірюваних, аналізованих і реєстрованих механічних коливань порушуються і вихідний електричний сигнал акселерометра спотворюється, а отже, дає невірне і помилкове уявлення про форму хвиль механічних коливань, що впливають на акселерометр. На рис. 3.7 порівнюються частотні залежності чутливості і фази (амплітудно-частотна і фазова характеристики) п'єзоелектричного акселерометра.

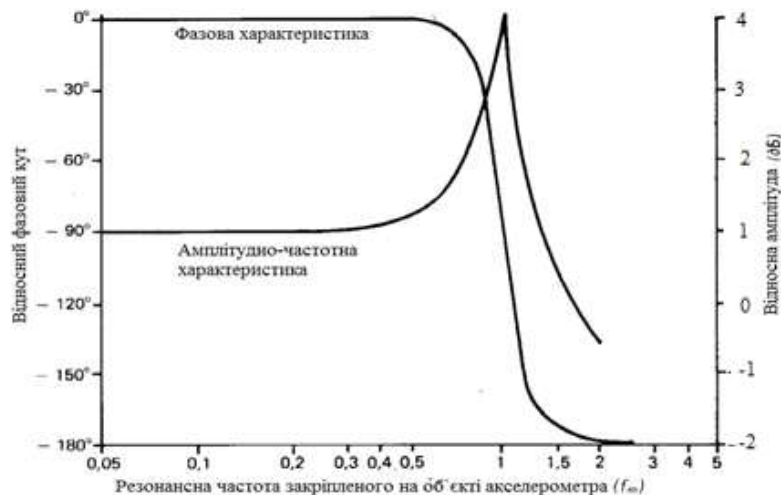


Рисунок 3.7 - Амплітудно-частотна і фазова характеристики п'єзоелектричного акселерометра

Затримкою часу і відповідним їй зрушенням фази можна знехтувати на всіх частотах в діапазоні, верхньою межею якого є відповідна початку обумовленої резонансом системи маса - пружина підйому чутливості акселерометра. Резонансний пік на більш високих частотах обумовлює запізнювання руху інерційної маси щодо руху основи акселерометра і, отже, є причиною фазового спотворення. Однак, мале демпфірування акселерометра ефективно звужує резонансу ділянку частотного діапазону і, отже, сприяє їх застосуванню на перевищуючих номінальню верхню межу робочого частотного діапазону без помітного фазового спотворення. У всякому разі потрібно враховувати фазову характеристику використовуваних разом з акселерометром підсилювачів заряду або напруги.

Робочий динамічний діапазон акселерометра визначається як діапазон, в якому вихідний електричний сигнал (заряд або напруга) прямо пропорційний прискоренню впливаючих на його основу механічних коливань [7, 11, 14, 16].

3.3.2. Перехідна характеристика

При вимірі, аналізі та (або) реєстрації короткочасних (перехідних) механічних коливань і механічних ударів необхідно приділяти особливу увагу лінійності використовуваної системи і, отже, лінійності її елементів, так як будь-якого роду нелінійність обумовлює спотворення підлягаючих дослідженню процесів. Рис. 3.8 ілюструє найбільш часті спотворення напівсинусоїдального механічного імпульсу.

						ДП ПІ51. 00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум	Підпись	Дата			29

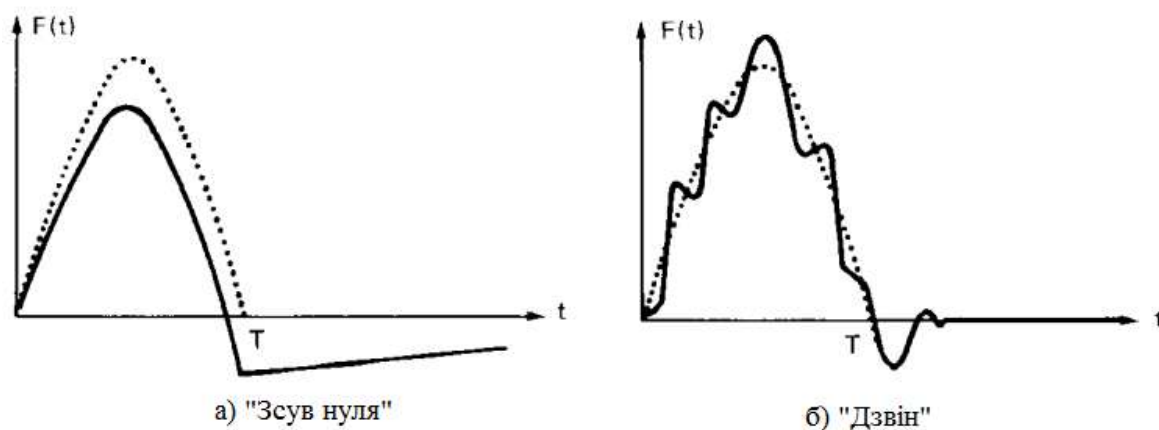


Рисунок 3.8 - Можливі реакції вібровимірювальних систем при порушенні напівсинусоїдальних механічних імпульсів тривалістю T

Зображене на рис. 3.8, а) спотворення відноситься до ефекту, званого «зрушення нуля» і обумовлено, головним чином, нелінійністю фазової характеристики підсилувача, в результаті якої низькочастотні складові досліджуваного процесу зазнають випередження фази щодо його основної складової. Хоча це спотворення не впливає на середньоквадратичне значення процесу, воно може змінювати його пікове значення.

4. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

При визначенні власної резонансної частоти акселерометра використовуються спрощені еквівалентні механічні схеми

а) вільно підвішена система

б) система з нескінченними масою і жорсткістю.

При розгляді пов'язаних з власною резонансною частотою акселерометра питань доцільно застосовуються показані на рис. 4.1 спрощені еквівалентні механічні схеми. Символами m_a , m_b і K позначені відповідно навантажувальна маса п'єзоелемента акселерометра інерційної маси, загальна маса підстави і корпусу акселерометра і еквівалентна жорсткість механічних з'єднань, наявних між інерційною масою, дисками п'єзоелемента і підставою акселерометра. Резонансна частота показана на рис. 4.1 а) вільно підвішеної механічної системи, що є еквівалентом п'єзоелектричного акселерометра, визначається виразом:

$$f_0 = f_s \sqrt{1 + \frac{m_s}{m_b}}, \quad (4.1)$$

де f_s - власна резонансна частота інерційної маси m_s , яка задовольняється виразом:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_s}} \quad (4.2)$$

З виразу 1 слідує, що власна резонансна частота вільної підвішеної системи залежить від взаємного співвідношення мас m_s і m_b . Отже, ця частота приймає високе значення в випадку акселерометрів з легкою основою і корпусом [3, 18].

Однак, збільшення резонансної частоти шляхом зменшення маси підстави акселерометра не має практичного сенсу, так як при кріпленні акселерометра на досліджуваному або випробуваному об'єкті необхідно також враховувати власну масу цього об'єкту. Кріплення акселерометра на поверхні об'єкту з нескінченною масою і жорсткістю (рис. 4.1, б) призводить до нескінченного значення маси i , отже, до рівності резонансної частоти акселерометра власній резонансній частоті його інерційної маси m_s і пружини K .

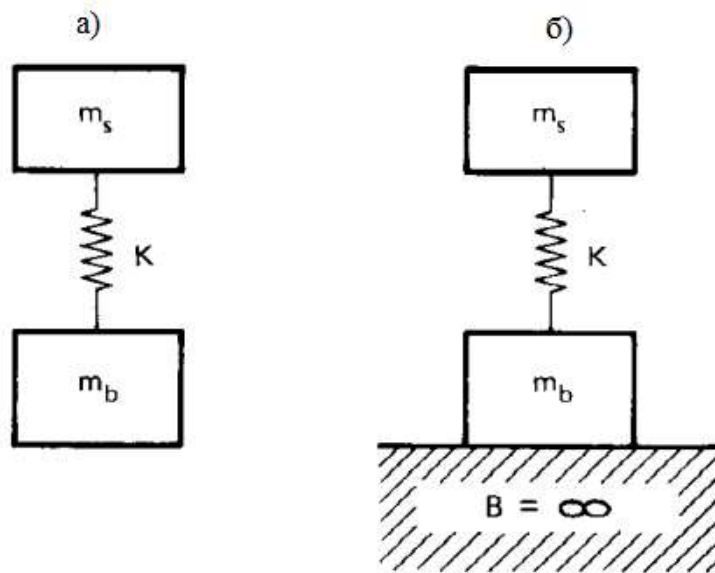


Рисунок 4.1 - Спрощені еквівалентні механічні схеми п'єзоелектричного акселерометра.

4.1. Проектування та розробка структурної схеми

На рис.4.2 представлено розроблену структурну схему віброперетворювача із підсилювачем сигналу.

Заряд пропорційний віброприскоренню, через екранований кабель надходить в підсилювач на вхід системи підсилювача заряду. Сигнал

посилюється і надходить на вхід фільтрів верхніх, нижніх частот для обмеження верхнього робочого діапазону частот, а потім на інтегратор. У інтеграторі відбувається перетворення сигналу миттєвого віброприскорення в миттєву віброшвидкість. Сигнал миттєвої віброшвидкості надходить на вхід струмового драйвера, що формує пропорційний струмовий сигнал (вихід 1).

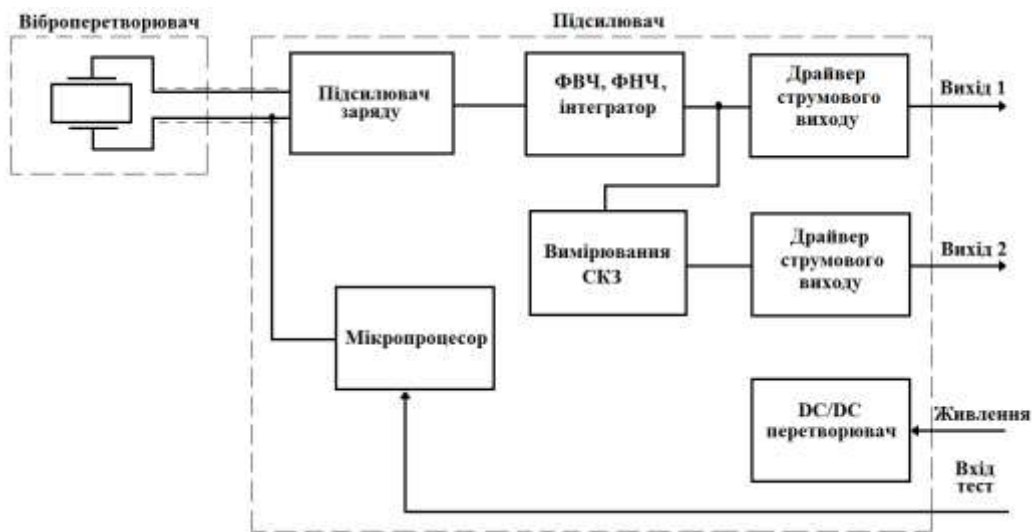


Рисунок 4.2 - Структурна схема

У деяких типах датчиків реалізована можливість формування струмового сигналу, пропорційного середньоквадратичному значенню (СКЗ) віброшвидкості (вихід 2). В цьому випадку в підсилювачі реалізується схема вимірювання СКЗ і додатковий драйвер струмового виходу.

Застосування датчика віброшвидкості здійснюється однополярною напругою +24 В. В підсилювачі розташований DC/DC перетворювач, що формує необхідні напруги живлення внутрішніх схем підсилювача. Застосування DC/DC перетворювача дозволяє залишатися датчику вібрації нечутливим до коливань напруги живлення в широкому

діапазоні, а також гальванічно ізолювати (в разі необхідності) джерело живлення від вимірювальних ланцюгів апаратури контролю вібрації.

Існують варіанти виконання датчиків віброшвидкості без застосування DC/DC перетворювачів в підсилювачах з ланцюгом зниження власних шумів, при цьому істотно посилюються вимоги до живлення датчика.

Вхідний тестовий сигнал і схема перевірки цього сигналу в мікропроцесорі дозволяють датчику займатися самотестуванням (перевіряти лінію зв'язку, цілісність чутливого елемента віброперетворювача і працездатність схеми підсилювача [9, 18, 19].

4.2. Вибір конструктивних матеріалів

4.2.1. П'єзоелектричні матеріали

П'єзоелектричним називається матеріал, механічна деформація якого супроводжується утворенням електричного заряду. До п'єзоелектричних матеріалів відносяться п'єзоелектричні монокристали, наприклад, монокристали кварцу, і штучно поляризована ферроелектрична кераміка, які є відносно складними сумішами титановоокислого барня, цинкоокислого свинцю і метаноокислого свинцю.

Можливість застосування п'єзоелектричних матеріалів в окремих акселерометрах визначається не тільки параметрами п'єзоелектричних матеріалів в окремих акселерометрах визначається не тільки параметрами їх п'єзоелектричного ефекту, а також іншими факторами [12].

											Лист
											34
Изм	Лист	№ докум	Підпись	Дата							

Ферроелектричні керамічні матеріали можуть оброблятися з метою надання їм практично будь-якої форми і їх хімічної складу можна змінювати так, щоб забезпечити потрібну експлуатаційну характеристику і відповідають різним областям застосування спеціальні параметри.

Більш складні питання і проблеми пов'язані з п'єзоелектричними монокристалами, хімічний склад яких не можна змінювати і форма яких значно залежить від форми вхідного монокристала. Отже, акселерометри з виготовленим з монокристалічних матеріалів п'єзоелементом мають в більшості випадків нижчі чутливість і власну ємність ніж акселерометри з п'єзоелементом з ферроелектричної кераміки [6, 16].

4.2.2. Розрахунок перетворювача

В якості первинного перетворювача п'єзоелектричного акселерометра виберемо п'єзоелемент з цирконату титанату свинцю (ЦТС-19). Даний матеріал має високу діелектричну проникність $\varepsilon = 1525$, ККД рівний 40%, модуль пружності $E = 70 \text{ Н/м}^2 \cdot 10^9$, $g_{ij} = 14.8 \text{ мВ/Н} \cdot 10^{-3}$. Допустима температура становить 300°C .

У акселерометрах, як правило, застосовуються дискові п'єзоелементи з великим відношенням діаметра до товщини ($2R/l = 6 \div 10$). Прийmemo діаметр п'єзоелемента $2R$ рівним 20 мм, тоді товщина l цього елемента складе 2 мм [5, 10].

За формулою (4.3) обчислимо власну ємність перетворювача:

$$C_o = \frac{\varepsilon_i}{l} = \frac{\varepsilon \pi R^2}{l} = 239 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \quad (4.3)$$

Сила, що діє на п'єзоелемент при прискореному русі, за другим законом Ньютона визначиться як:

$$F = m \cdot a, \quad (4.4)$$

де m – значення інерційної маси, кг;

a - значення прискорення, м / с².

Задамо максимальне значення сили 5,5 Н, а значення інерційної маси $m = 50$ г. Тоді, відповідно до рівняння (4.4), максимальне прискорення визначиться як:

$$a = \frac{F}{m}$$

$$a = \frac{5.5}{5 \cdot 10^{-3}} = 110, \text{ м/с}^2$$

Чутливість акселерометра по заряду S_Q визначається відношенням

$$S_Q = \frac{Q}{a} = d_{33} \cdot m,$$

$$S_Q = 282 \cdot 10^{-12} \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 14 \cdot 10^{-11} \text{ Кл/м} \cdot \text{с}^2$$

Визначимо заряд, що виникає на поверхні п'єзоелемента при дії прискорення [3]. Так як при поздовжньому п'єзоефекті заряд не залежить від розміру пьезоелемента, тоді

$$Q = d_{33} \cdot F,$$

де d_{33} - значення п'єзомодуля, Кл/Н · 10⁻¹²;

F - сила, Н.

$$Q = 282 \cdot 10^{-12} \cdot 5.5 = 1.5 \cdot 10^{-9}, \text{ Кл}$$

Коефіцієнт g_{ij} є постійною для п'єзоматеріалу в разі розімкнутого ланцюга. Ця постійна описує чутливість по напрузі п'єзоматеріалу і визначається як:

$$g_{ij} = \frac{U/l}{F/s} \quad (4.5)$$

Коефіцієнт g_{ij} найбільш зручний для розрахунку вихідної напруги п'єзoeлектричного перетворювача, якщо не розглядається шунтуюча ємність [19]. Зв'язок постійної g_{ij} з п'єзoeлектричною постійною d_{ij} виражається наступною рівністю:

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}, \quad (4.6)$$

де ε_0 - електрична постійна.

Виходячи з формул (4.5) і (4.6), обчислимо вихідну напругу перетворювача:

$$U = \frac{g_{ij} \cdot Fl}{s} = \frac{d_{ij} \cdot Fl}{s \varepsilon \varepsilon_0},$$
$$U = \frac{282 \cdot 10^{-12} \cdot 5,5 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{165 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1525} = 1,8 \cdot 10^{-11}, \text{В.}$$

4.3. Вплив умов навколишнього середовища

Акселерометри часто використовуються в польових умовах і при різкій зміні, аналізі або реєстрації механічних коливань об'єктів, які перебувають у вкрай несприятливих умовах навколишнього середовища.

Тому важливо, щоб вони мали якомога малу чутливістю до умов зовнішнього середовища і їх змін [2].

4.3.1. Температура

Підвищення температури за верхню межу робочого діапазону акселерометра супроводжується повільною деполяризацією матеріалу його п'єзоелемента і відповідної їй перманентною втратою чутливості по заряду і напрузі. Цей процес відбувається повільно в діапазоні до 50 градусів за Цельсієм, але значно прискорюється при подальшому збільшенні температури, зокрема поблизу точки Кюри п'єзоелектрика.

Сильна деполяризація п'єзоелектричного матеріалу призводить до практично повної втрати чутливості акселерометра.

Крім залежності параметрів від температури, п'єзоелектричні акселерометри також чутливі до змін температури. Під впливом температури вони генерують повільно змінюваний електричний сигнал. Цей сигнал є результатом двох основних ефектів:

1. піроелектричного ефекту, притаманного змінам температури елементів з поляризованої ферроелектричної п'єзокераміки;
2. неоднорідності теплового розширення і стиснення корпусу деталей акселерометра, що зумовлює деформацію п'єзоелемента або піддає його впливу сили зі змінною амплітудою [15].

4.3.2. Вологість

Герметично ущільнені корпуси (заварені або заклеєні епоксидними смолами) акселерометрів відрізняються високою стійкістю щодо впливів вологи і більшості промислових корозійних речовин. Ці ущільнення корпусу гарантують надійну роботу акселерометрів у вологих середовищах і при застосуванні ізольованих тефлоном сполучних кабелів

і ущільненні з'єднувачів навіть в рідинах або середовищах, в яких не виключена сильна конденсація [6].

4.3.3. Деформація основи

Деформація основи акселерометра може бути обумовлена деформацією поверхні об'єкта, на якому він закріплений. Електричний сигнал, що віддають акселерометром в результаті деформації його основи, нічим не пов'язаний з предметом вимірювання, аналізу або реєстрації прискоренням механічних коливань. Чутливість акселерометра до деформації основи зазвичай виражається в м/с^2 на мільйонну частку одиниці деформації або в g на мільйонну частку одиниці деформації і наводиться серед його технічних даних. Щоб довести до мінімуму деформацію, акселерометри зазвичай мають міцні масивні підстави.

4.3.4. Магнітні поля

Вплив магнітних полів на п'єзоелектричні акселерометри зазвичай незначна. Чутливість окремих акселерометрів до магнітних полів знаходиться в межах від 0,01 - 0,03 g/кГаусс навіть при найбільш несприятливому орієнтації магнітного поля [2, 16].

4.4. Конструкція та конструктивні особливості акселерометрів

Кабель між датчиком і підсилювачем-перетворювачем захищений металевим рукавом і жорстко з'єднаний як з віброперетворювачем, так і з підсилювачем-перетворювачем. Існують різні види виконання виробів з роз'ємним з'єднанням віброперетворювача і підсилювача-перетворювача.

Изм.	Лист	№ докум	Підпись	Дата

У разі необхідності електрично ізолювати віброперетворювач і з'єднувальний кабель від контрольованого обладнання, віброперетворювач встановлюється через ізоляційну пластину, а металевий рукав з'єднувального кабелю захищається ізоляційною маслостійкою термоусаджувальною трубкою.

Підсилювач-перетворювач виконаний в міцному бризкозахисному металевому корпусі, що має уніфіковані габаритні розміри. На корпусі підсилювача-перетворювача передбачена розмикаюча клемна колодка. Чутливий елемент віброперетворювача розташований в міцному герметичному корпусі з нержавіючої сталі зі стандартними установочними розмірами (трикутна підставка з кріпленням до контрольованої поверхні за допомогою 3-х гвинтів) [3, 7].

Чутливий елемент віброперетворювача складається з блоку п'єзоелементів, електрично ізольованих від корпусу. Кришка віброперетворювача з'єднується з корпусом різьбою.

Джгут віброперетворювача виготовлений з антивібраційного двох-провідного екранованого кабелю, захищений металорукавом. Ступінь захисту віброперетворювачів допускає їх експлуатацію в умови впливу пилу і піску, спеціальних середовищ (масел, мастил і палива на основі нафтопродуктів, дезінфікуючих, дегазуючих розчинів), у вибухонебезпечних зонах.

Підсилювальний блок призначений для посилення заряду на чутливому елементі віброперетворювача, обробки (інтегрування) і перетворення в струмовий сигнал, пропорційний миттєвій віброшвидкості або СКЗ віброшвидкості [5, 17].

4.5. Розрахунок параметрів інерційної маси.

Форма інерційної маси впливає на характеристики датчика. Зменшення поперечної чутливості вимагає зменшення відстані між центром маси інерційного елемента і центром маси п'єзоелемента. У зв'язку з цим інерційну масу бажано виконувати з малою висотою.

Задамо значення інерційної маси $m = 50$ г. Маса являє собою циліндр (рис. 4.3). Так як відомі діаметр основи, маса і щільність матеріалу, обчислимо висоту інерційної маси [4, 9].

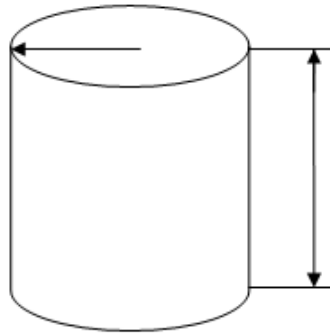


Рисунок 4.3 - Форма інерційної маси

Обсяг циліндра знаходиться за формулою:

$$V = \pi R^2 H, \quad (4.7)$$

де R – радіус основи, м;

H – висота циліндра, м.

З іншої сторони, об'єм визначається:

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (4.8)$$

де m – значення інерційної маси, кг;

ρ – густина, кг/м³.

Підставивши формулу (4.7) в (4.8), получимо:

$$\pi R^2 H = \frac{m}{\rho}$$

З отриманої формули знайдемо значення висоти циліндра:

$$H = \frac{m}{\pi R^2 \rho}$$

$$H = \frac{50}{36 \cdot 3.14 \cdot 7.252} = 0.016, \text{ м}$$

Основу п'єзоелектричного акселерометра виготовляють з відносно легких, але досить міцних матеріалів. Як матеріал для виготовлення підстави датчика, що розробляється в цій роботі, виберемо титан ВТЗ-1 ГОСТ 19807-91 ($\rho = 4.5 \text{ г / см}^3$), по механічним характеристикам не поступається сталі [15].

Для зчленування деталей акселерометра використовують пайку і склеювання. При пайці необхідно попередньо проводити сріблення поверхонь шляхом випалювання срібла при температурі близько 5000 градусів, що значно ускладнює процес виготовлення. Найбільш широке застосування знайшло склеювання. Воно забезпечує надійне зчленування елементів, не приводячи до додатковим похибок.

Для склеювання застосуємо клей БФ-4 ДСТУ Б В.2.6-45:2008, який використовується для кольорових металів, нержавіючої сталі, для їх склеювання з неметалами.

4.6. Розрахунок резонансних характеристик п'єзоелемента

Розрахунок резонансних характеристик п'єзоелемента проведемо на прикладі пластинчатого цирконат титанат свинцю ЦТС 842. Цей матеріал використовується для виготовлення п'єзодвигунів, п'єзоелементів і віброелементів широкого призначення. Геометричні параметри пластини п'єзоелементу: ширина $l_1 = 5$ мм; довжина $l_2 = 10$ мм; висота $l_3 = 2$ мм [14].

Компанія-виробник п'єзокераміки APC International Ltd. декларує наступні характеристики матеріалу ЦТС 842 [10]:

- відносна діелектрична проникність $K^T = \frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_0} = 1250$;
- точка Кюрі [°C] $T_c = 325$;
- коефіцієнт електромеханічного зв'язку $k_{31} = 0.35$;
- п'єзоелектричний модуль [10^{-12} Кл/Н] $d_{33} = 300$ – $d_{31} = 125$; $d_{15} = 480$;
- модуль Юнга [10^{10} Н/м²] $Y_{11} = 8$; $Y_{33} = 6.8$;
- щільність [г/см³] $\rho = 7.6$;
- добротність $Q_m = 600$.

В примітках до наведених вище характеристик п'єзокераміки фірма виробник вказує: «Значення отримані на тестових зразках і можуть використовуватися тільки довідково. На практиці п'єзокерамічні компоненти показують відмінні параметри в залежності від товщини, конфігурації, якості і способу обробки поверхні.» [10].

Для розрахунку частотної характеристики п'єзоелемента, необхідно визначити власну ємність п'єзоелемента, яку можна розрахувати за формулою:

$$C_{\text{пе}} = \frac{K^T \cdot \varepsilon_0 \cdot l_1 \cdot l_2}{l_3} (1 - k_{31}^2),$$

де K^T – відносна діелектрична проникність; ε_0 – електрична стала ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); $l_1 \cdot l_2$ – площа грані п'єзоелемента; l_3 – товщина пластини п'єзоелемента; k_{31} – коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Підставляючи значення параметрів в формулу, розрахуємо власну ємність п'єзоелемента:

$$C_{\text{пе}} = \frac{1250 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} (1 - 0,35^2) = 2,43 \cdot 10^{-10}, \text{ Ф}$$

Власна резонансна частота для пластинчастого п'єзоелемента визначається його механічними характеристиками – щільністю і пружністю:

$$\omega_0 = \frac{1,58}{l_3} \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho}},$$

де Y_{11} – модуль Юнга; ρ – щільність. Підставляючи значення параметрів в формулу, розрахуємо власну резонансну частоту:

$$\omega_0 = \frac{1,58}{2 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{8 \cdot 10^{10}}{7,6 \cdot 10^6}} = 810522,5 \text{ Гц}$$

Резонансна частота електромеханічної системи розраховується з урахуванням коефіцієнта електромеханічного зв'язку:

$$\omega_p = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - k_{31}^2}} = \frac{810522,5}{\sqrt{1 - 0,35^2}} = 865249,8 \text{ Гц}$$

Ширину смуги пропускання розрахуємо з урахуванням добротності Q_m :

$$\Delta\omega = \frac{\omega_p}{Q_m} = \frac{865249.8}{600} = 1442.1 \text{ Гц}$$

Граничні частоти смуги пропускання резонансної системи (ω_1 і ω_2) визначаються з системи рівнянь:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1;$$

$$\omega_p = \sqrt{\omega_1 \omega_2};$$

З урахуванням розрахованих значень $\Delta\omega$ і ω_p отримаємо:
 $\omega_1 = 86429,05 \text{ Гц}; \omega_2 = 865971,15 \text{ Гц}.$

З урахуванням того, що індуктивний опір електричної системи має дорівнювати інерційному опору механічної, отримаємо значення індуктивності послідовного коливального контуру: $L = V\rho$, де V – об'єм пластини п'єзоелемента, $V = l_1 \cdot l_2 \cdot l_3$.

Отже, $L = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 7.6 \cdot 10^6 = 0.76$.

Опір електричної моделі визначимо з формули добротності послідовного резонансного контуру: $Q_m = \frac{\omega_p L}{R}$:

$$R = \frac{\omega_p L}{Q_m} = \frac{865429.8 \cdot 0.76}{600} = 1096,0 \text{ Ом}$$

Визначимо комплексну частотну характеристику п'єзоелектричної системи $Y(j\omega)$, де Y - електрична провідність:

$$Y(j\omega) = C_{\text{пе}} j\omega + \frac{1}{R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)} = \\ = \frac{-C_{\text{пе}} R C \omega^2 + ((C_{\text{пе}} + C)\omega - C_{\text{пе}} L C \omega^3)j}{1 - LC\omega^2 + RC\omega j}$$

Перейдемо до показової форми запису комплексних величин:

$$Y(\omega j) = \sqrt{\frac{(-C_{пе}RC\omega^2)^2 + ((C_{пе} + C)\omega - C_{пе}LC\omega^3)^2}{(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2}} \times$$

$$\times e^{j\left(\arctg\frac{(C_{пе}+C)-C_{пе}LC\omega^2}{-C_{пе}RC\omega} - \arctg\frac{RC\omega}{1-LC\omega^2}\right)} = Y(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

де $Y(\omega)$ - амплітудно-частотна характеристика (АЧХ); $\varphi(\omega)$ - фазо-частотна характеристика (ФЧХ) [4][13].

4.7. Калібрування акселерометрів

Калібрування акселерометра складається, головним чином, у визначенні його чутливості. Визначивши чутливість, можна змінювати параметри і, часто, при застосуванні однієї і тієї ж калібрувальної системи визначати частотну, температурну і амплітудну характеристики. Деякі з найбільш часто використовуваних методів калібрування коротко розглянуті нижче.

Метод порівняння ґрунтується на методі порівняння калібрувань, акселерометр встановлюється на якомога малій відстані від еталонного акселерометра (наприклад, основи обох можуть стикатися одна з одною) на збудник, що генерує механічні коливання з точно визначеними параметрами. Чутливість калібруємого акселерометра визначається шляхом порівняння його вихідного електричного сигналу з вихідним електричним сигналом еталонного акселерометра. Похибка калібрування при ретельному застосуванні методу порівняння не перевищує 2%.

Абсолютні методи

В області віброметрії широко використовуються два методу абсолютної калібрування акселерометрів:

- Метод взаємності
- Метод інтерференції, зокрема лазерної інтерференції

Похибка калібрування, здійснюваної за обома цими методами не перевищує 0,5% [4, 8].

В майбутній магістерській роботі заплановано провести дослідження віброакселерометра на вібростенді.

					ДП ПІ51. 00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум	Підпись	Дата		47

Підсумки

Зрушення нуля похибки амплітуди при вимірюванні, аналізі та (або) реєстрації напівсинусоїдальної та інших короткочасних механічних коливань і ударів можна тримати в межах $\pm 5\%$ тоді, коли нижня межа робочого частотного діапазону підсилювача буде менша за значення $0,008 / T$, де T - позначає тривалість процесу. Це відноситься до виміру і реєстрації механічних ударів і повторюваних короткочасних механічних коливань за допомогою систем, в яких передпідсилювачі працюють в режимі вимірювання прискорення. Інтегрування короткочасних механічних коливань і ударів електронними інтеграторами з метою визначення їх швидкості і зміщення не рекомендується, так як передбачені в зовнішньому підсилювачі інтегратори мають нелінійну фазову характеристику [8].

Однак, акселерометри можуть також бути причиною описаного вище зсуву нуля. Цей ефект може бути обумовлений накопиченням заряду п'єзоелектричним елементом і його повільною зарядкою, яка відбувається з відповідною постійною часу швидкістю комбінації акселерометр - передпідсилювач. Слід підкреслити, що описуваний ефект спостерігається тільки при впливі на акселерометр механічних ударів з відносно великими амплітудами прискорення і що не можна досить точно визначити діапазон амплітуд, в якому цей ефект стає помітним.

Отже, зрушенню нуля слід приділяти особливу увагу при впливі на акселерометр першого і наступних за ним кілька механічних ударів.

Частотна характеристика фільтра нижніх частот або передпідсилювача, потрібна для демпфірування резонансу акселерометра

(f_m) при вимірюванні, аналізі або реєстрації напівсинусоїдальних механічних ударів тривалістю $T = \frac{1}{f_m}$ і максимально допустимою похибкою амплітуди 10%

Спотворення через ефект, так званий «дзвін». Такого роду спотворення спостерігається тоді, коли підлягає дослідженню короткочасний процес містить високочастотні складові, які доходять до області власного резонансу акселерометра. Для обмеження і утримування обумовленої описаним вище ефектом похибки амплітуди в межах $\pm 5\%$ необхідно, щоб власна резонансна частота закріпленого на об'єкті акселерометра дорівнювала або перевищувала значення $\frac{10}{T}$ [12].

5. ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

П'єзоелектричний акселерометр призначений для перетворення в електричний сигнал змінного струму віброприскорення механічних коливань по одній із складових коливань - горизонтальної (поперечної або осьової) або вертикальної залежно від місця установки датчика на об'єкті контролю.

П'єзоелектричний акселерометр загалом використовується в складі контрольно - сигнальних пристроїв, для вимірювання параметрів вібрації промислового обладнання.

До складу п'єзоелектричного акселерометра входять п'єзоелектричні елементи, вантаж, пружина, високотемпературний кабель, металорукав, штуцер, гвинт і корпус.

П'єзоелектричний акселерометр підключається до вторинних вимірювальних приладів двохканальною лінією зв'язку [5].

5.1. Розрахунок технологічності приладу

В поняття технологічності виробу при складанні входить: простота складання виробу загалом та складальних одиниць без пригонки та доробок, яка забезпечується економічно доцільними допусками в розмірних, кінематичних та електричних ланцюгах. Технологічними виробами є ті, які забезпечують паралельність складання, можливість диференціації складання, найбільшу уніфікацію та нормалізацію деталей,

					ДП ПІ51. 00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум	Підпись	Дата		50

можливість використання автоматизації процесів складання при найменшій кількості матеріалів та обладнання, що забезпечує скорочення виробничого циклу.

Таблиця 5.1 – Уніфікація використовуваних деталей

№	Назва деталі	Кількість деталей	Уніфікація
1	Кришка	1	н/уніф.
2	Основа	1	н/уніф.
3	Штуцер	1	н/уніф.
4	Вантаж	1	н/уніф.
5	Гвинт	1	н/уніф.
6	Пружина	1	н/уніф.
7	Шайба	3	н/уніф.
8	Пьезоелемент ЦТС-83Г	3	уніф.
9	Кабель високотемпературний	1	уніф.

Таблиця 5.2 – Уніфікація використовуваних операцій

№	Назва операції	Уніфікація
1	Встановити	н/уніф.
2	Контролювати	н/уніф.
3	Зварити	уніф.
4	Склеїти	уніф.
5	Загвинтити	уніф.

Розрахунок критерій технологічності приладу:

5.1.1. Критерій складності виробу:

$$K_{\text{скл}} = \frac{N_{\Sigma}}{n_{\Sigma}}, \quad (5.1)$$

де N_{Σ} - число основних складальних одиниць виробу;

n_{Σ} - число всіх деталей виробу по специфікації;

$K_{\text{скл}} < 0,2$ – технологічність незадовільна;

$0,2 < K_{\text{скл}} < 0,4$ – технологічність задовільна;

$K_{\text{скл}} > 0,4$ – технологічність добра;

$K_{\text{скл}} = \frac{4}{11} = 0,36$ – технологічність задовільна, оскільки коефіцієнт знаходиться в діапазоні $0,2 \dots 0,4$;

5.1.2. Критерій уніфікації виробу:

$$K_y = \frac{(N_y + n_y)}{(N_{\Sigma} + n_{\Sigma})}, \quad (5.2)$$

де N_y – число уніфікованих складальних одиниць;

n_y – число уніфікованих деталей;

$K_y < 0,25$ – технологічність незадовільна;

$0,25 < K_y < 0,5$ – технологічність задовільна;

$K_y > 0,5$ – технологічність добра;

$K_y = \frac{0+3}{4+11} = \frac{3}{15} = 0,3$ – технологічність задовільна, оскільки коефіцієнт знаходиться в діапазоні 0,25...0,5;

5.1.3. Показник уніфікації складальних одиниць:

$$K_{yco} = \frac{Ny}{N\Sigma} \quad (5.3)$$

$K_{yco} < 0,2$ – технологічність незадовільна;

$0,2 < K_{yco} < 0,4$ – технологічність задовільна;

$K_{yco} > 0,4$ – технологічність добра;

$K_{yco} = \frac{0}{4} = 0$ – технологічність незадовільна, оскільки коефіцієнт знаходиться в діапазоні 0...0,2;

5.1.4. Показник уніфікації деталей:

$$K_{уд} = \frac{ny}{n\Sigma} \quad (5.4)$$

$K_{уд} < 0,3$ – технологічність незадовільна;

$0,3 < K_{уд} < 0,6$ – технологічність задовільна;

$K_{уд} > 0,6$ – технологічність добра;

$K_{уд} = \frac{4}{11} = 0,36$ – технологічність задовільна, оскільки коефіцієнт знаходиться в діапазоні 0,3...0,6;

5.1.5. Показник уніфікації технологічного процесу:

$$K_{ун.опер.} = \frac{K_{ун.опер}}{K_{заг.опер}} \quad (5.5)$$

$K_{ун.опер} < 0,5$ – технологічність незадовільна;

$0,5 < K_{\text{ун.опер}} < 0,75$ – технологічність задовільна;

$K_{\text{ун.опер}} > 0,75$ – технологічність добра;

$K_{\text{ун.опер}} = \frac{2}{4} = 0,5$ – технологічність задовільна, оскільки коефіцієнт знаходиться в діапазоні $0,5 \dots 0,75$;

5.1.6. Показник уніфікації технологічного процесу:

$$K_{\text{ун.опер}} = \frac{K_{\text{ун.опер}}}{K_{\text{заг.опер}}} \quad (5.6)$$

$K_{\text{ун.опер}} < 0,5$ – технологічність незадовільна;

$0,5 < K_{\text{ун.опер}} < 0,75$ – технологічність задовільна;

$K_{\text{ун.опер}} > 0,75$ – технологічність добра;

$K_{\text{ун.опер}} = \frac{3}{5} = 0,6$ – технологічність задовільна, оскільки коефіцієнт знаходиться в діапазоні $0,5 \dots 0,75$;

5.1.7. Комплексний показник уніфікації виробу:

$$K_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \quad (5.7)$$

n – загальна кількість показників технологічності;

$K_{\Sigma} < 0,3$ – технологічність незадовільна;

$0,3 < K_{\Sigma} < 0,5$ – технологічність задовільна;

$K_{\Sigma} > 0,5$ – технологічність добра;

$K_{\Sigma} = \frac{0,36+0,3+0+0,36+0,5+0,6}{6} = 0,353$ – технологічність задовільна, оскільки коефіцієнт знаходиться в діапазоні $0,3 \dots 0,5$;

5.2. Параметрична точність складання

У приладобудуванні велике значення має параметрична точність, так як сучасні прилади мають у своїй конструкції різнобічні функціональні та перетворюючі елементи, що працюють на базі різних фізичних параметрів: механічних (жорсткість пружини, мембран, сільфонів; точність передачі зубчастих редукторів тощо); електричних (точність опору резисторів та потенціометрів, ємності конденсаторів, індуктивності котушок); магнітних, оптичних та інших характеристик [20].

Усі ці фізичні параметри елементів приладів є похідними цілого ряду первісних характеристик, з якими вони знаходяться у визначеній функціональній залежності, що визначається рівняннями зв'язку або передаточними функціями:

$$Q_0 = \varphi_0(q_1; q_2; \dots; q_n) = \varphi_0(q_i), \quad (5.8)$$

де Q_0 – номінальне значення вихідного фізичного параметру;

$q_1; \dots; q_n$ – первісні, що визначають його характеристики у своєму номінальному (розрахунковому) значенні.

5.3 Проектування схеми ступенів складання

Створенню технологічного процесу складання передують розробка схеми ступенів складання та технологічної схеми складання, які є підготовчим етапом у проектуванні всього технологічного процесу складання [16].

5.4 Проектування технологічної схеми складання

Схема містить окремі гілки вузлових складань і загального складання приладу. Кожна гілка починається з базової деталі, або з базового вузла, за які беруть складні базові деталі або складальні одиниці нижчих ступенів складання. Складальний процес зображується на схемі лінією зліва – направо. Розглядаючи гілки складання складальної одиниці вищого ступеня складання даного приладу, схему розвертають за годинниковою стрілкою на 90° , а будуючи гілки складання складальних одиниць нижчих ступенів, які входять до складніших складальних одиниць, додатково обертають у той самий бік. Знизу на лінію складання подаються складальні одиниці нижчих ступенів складання та основні деталі приладу, а згори – стандартні та нормалізовані деталі.

5.5 Проектування структурної схеми складання

Структурна схема складання виробу отримується на основі аналізу конструкторської документації: креслень, специфікацій, комплектувальних відомостей і технічних умов. Виріб розчленовується на окремі компоненти складання – складальні одиниці та деталі. Залежно від складності ці елементи розміщують за ступенями схеми складання [20].

					ДП ПІ51. 00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		56

Підсумки

Отже, в результаті розрахунків було отримано задовільну технологічність приладу. Однак деякі окремі показники є незадовільними, що, на жаль, негативно вплине на виробництво та збільшить час на виготовлення всього приладу. Також було спроектовано схеми ступенів складання – технологічна схема складання та структурна схема складання.

					ДП ПІ51. 00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум	Підпись	Дата		57

ВИСНОВОК

В результаті виконання дипломного проекту було проведено літературний огляд та аналіз теми «Датчики вібрації»; ознайомилися із основними датчиками вібрації та поняттям вібрації; проаналізували основні зовнішні фактори які впливають на похибку роботи п'єзоелектричного акселерометра; розглянули основні матеріали із яких виготовляється п'єзоелектричний акселерометр їх переваги та недоліки; розробили структурну схему п'єзоелектричного акселерометра, технічну схему складання, структурну схему складання, розрахували вантаж, а також провели розрахунок основних параметрів підсилювача; ще були визначені основні геометричні параметри та технічні характеристики перетворювача та п'єзоелектричного елемента. Підводячи підсумки сказаного, можна зробити висновок, що пристрої, створені на основі розглянутих робочих принципів, є досить точними і надійними, що забезпечують неперервну та якісну роботу в жорстких умовах експлуатації, та високі робочі характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров А.А. «Систематика, принцип работы и области применения датчиков». Журнал радиоэлектроники. 2009. №3.
2. Брюль и Кьер Справочник по теории и эксплуатации «Пьезоэлектрические акселерометры и предусилители».
3. А.Бойко, А.Заводян, Б.Симонов. «Микромеханические акселерометры: моделирование элементов конструкции и изготовление» , 2009, № 8.
4. Звягинцев А.М., Красников А.Л., Курносов Н.М. и др. Полевая шина «Fieldbus» - новая перспектива в автоматизации управления технологическими процессами // Датчики и системы . 1999. №7,8.
5. Ф. М. Диментберг и К. С. Колесников «Колебания машин, конструкций и их элементов», Машиностроение, 1980, 295 с.
6. Парасына А.С., Толушкин Г.С., Такшин И.А., Машков Д.В. Интеллектуальные датчики вибрации типа ИЦФР // Датчики и детекторы для АЭЗ «ДДА-ЭС-2004»: Сборник докладов научно-технической конференции – Пенза: ФГУП «НИИ физических измерений», 2004 г. – 298 с.
7. Гольдин А.С. «Вибрация роторных машин» Машиностроение, 1999, 302 с.
8. Балицкий Ф. Я. «Современные методы и средства вибрационной диагностики МиК, 1990.
9. Ицкович Э.Л. Современные интеллектуальные датчики общепромышленного назначения, их особенности и достоинства. // Датчики и системы, 2002. №2.

10. Symmetron Group: Elektronnyye komponenty [Electronic componens. Piezoceramics].
Available at: <http://www.symmetron.ru/suppliers/apc/index.shtml>.
11. Mason W.P. Barium-titanate ceramic as an electromechanica ltransducer // Phys. Rev. 1948. 74. No. 9. P.1 134; Bell labor.Rec.1949. No. 27. P.285-289.
12. Глозман И.А. Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972. 288 с.
13. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики // Мир электроники / Под ред. В.М.Шарапова.- М.: Техносфера, 2006.-632 с. ISBN 5-94836-100-4.
14. Пьезоэлектрические приборы для измерения давлений, усилий, ускорений. Проспект фирмы «Kistler Instrumene AG.» 1999. 12 с.
15. Сайт института NIST IEEE-P1451 Draft Standart Home Page <http://https://www.nist.gov/>
16. Панич А.Е., Вусевкер Ю.А., Филиппов Е.В., Пашков С.В., Степанович Д.С Исследование электрофизических параметров пьезоэлементов из материалов ПКЛ-1, ПКЛ-2, ПКЛ-3 //Международная научно-практическая конференция.
17. Раков В.И., Хилов В.С. О системном характере изменений функций и структур датчиков // Промішленные АСУ и контроллеры, 2004. №12.
18. Богущ М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации //Пьезоэлектрическое приборостроение том III / Под. ред. Панича А.Е. Ростов-на Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. С 335. ISBN 5-87872-351-4.
19. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Бондаренко Ю.Ю. и др. Пьезоэлектрические преобразователи (Справочное пособие) / Под ред. В.М.Шарапова.- Черкассы: ЧГТУ, 2004. 435 с.

20. Справочник технолога - машиностроителя. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1985. - Т.1.

					ДП П151. 00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		61

ДОДАТКИ