

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно- вимірювальних технологій та  
енергетичного менеджменту

Хоминець Владислав Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 535.65

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Удосконалення засобів вимірювання вібрації машин і механізмів

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

Хоминець В.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Кононенко Марина Андріївна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

В.С. Цих

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ

2025

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут \_\_\_\_\_ факультет автоматизації та енергетики \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту \_\_\_\_\_  
Освітній рівень \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ метрологія та вимірювальна техніка \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

ІВТ ЕМ \_\_\_\_\_

Цих В.С. \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025

року

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

\_\_\_\_\_ Хоминець Владислав Володимирович \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення засобів вимірювання вібрації машин і механізмів

керівник роботи \_\_\_\_\_ Кононенко Марина Андріївна, к.т.н., доцент, \_\_\_\_\_  
затверджені наказом закладу вищої освіти від "10" грудня 2025 року № 734/7

2. Строк подання студентом роботи 15.12.2025 року \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: удосконалення вимірювачів вібрації на основі п'єзоелектричних акселерометрів з метою розширення частотного діапазону за допомогою методу корекції

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз методів і засобів вимірювання параметрів вібрації. 2. Дослідження переваг та недоліків п'єзоелектричних засобів віброметрії 3. Удосконалення засобів вимірювання вібрації машин і механізмів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. МР.МТТм- .00.00.001 –; 2. МР.МТТм- .00.00.002 –; 3. МР.МТТм- .00.00.003 –;

4. МР.МТТм- .00.00.004 –; 5. МР.МТТм- .00.00.005 –;



## ЗМІСТ

|  |  |
|--|--|
| ВСТУП.....   |  |
| 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ.....  |  |
| 1.1 Вібрація, параметри вібрації. Основи віброметрії.....  |  |
| 1.2 Аналіз методів і засобів вимірювання вібрації.....   |  |
| 1.2.1 Аналіз методів вимірювання і обробки результатів вібродіагностики .....  |  |
| 1.2.2 Аналіз засобів вимірювання вібрації.....   |  |
| 1.2.3 Аналіз давачів для засобів вимірювання параметрів вібрації.....  |  |
| 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕВАГ ТА НЕДОЛІКІВ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАСОБІВ ВІБРОМЕТРІЇ.....   |  |
| 2.1 Принцип роботи п'єзоелектричного акселерометра .....   |  |
| 2.2 Аналіз роботи п'єзоелектричного акселерометра під впливом зовнішніх факторів.....  |  |
| 2.3 Аналіз причин виникнення похибок п'єзоелектричного акселерометра.....  |  |
| 3 УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЇ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ .....  |  |
| 3.1 Основні напрямки розвитку засобів віброметрії .....  |  |
| 3.2 Забезпечення максимальної ефективності вимірювального кола п'єзоелектричного давача.....   |  |
| 3.3 Визначення параметрів п'єзоелектричного перетворювача при підключенні його до вимірювального кола.....                               |  |
| 3.4 Розширення частотного діапазону п'єзоелектричного акселерометра  |  |
| 3.5 Застосування методу корекції амплітудо-частотної характеристики для розширення частотного діапазону п'єзоелектричних віброметрів ... |  |
| ВИСНОВКИ.....  |  |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....   |  |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасне життя неможливе без вимірювань і без різноманітних засобів вимірювання: приладів і пристроїв, перетворювачів і давачів, установок і систем. Вимірювання супроводжують наше життя всюди. Без вимірювання і засобів, що їх здійснюють, не може існувати ні виробництво, ні транспорт, ні медицина, ні сільське господарство, ні транспорт, ні зв'язок. Тому що саме за результатами вимірювання приймається рішення про стан виробничого процесу, про якість продукції і правильність надання послуг. І всюди до вимірювання висувають вимоги точності, оперативності і надійності, що обумовлює постійний процес удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання та розроблення нових, що засновані на досягненнях новітніх технологій виготовлення, використання матеріалів з унікальними характеристиками та нових підходів оброблення вимірювальної інформації.

За остання роки особливого розвитку набули методи і засоби вимірювання параметрів вібрації, оскільки контроль і моніторинг вібрації складає основу віброзахисту складних машин і механізмів від їх передчасного виходу з ладу, запобігає аваріям техногенним катастрофам, що без сумніву має великий техніко-економічний ефект.

Щоб оцінити вібрацію механізму чи машини та її шкідливу дію необхідно виміряти певні параметри вібрації, до яких у першу чергу відносять прискорення, швидкість та переміщення. Своєчасні дослідження і випробування техніки на вплив коливальних процесів дає можливість правильно прийняти конструктивні рішення і забезпечити в подальшому надійність і безпеку в процесі експлуатації.

Вимірювання та аналіз параметрів вібрації набули значного розвитку опираючись на досягнення електронної техніки та обчислювальних пристроїв, котрі забезпечують впровадження нових методів обробки одержаної вимірювальної інформації.

Але підвищення точності і надійності засобів віброметрії, створення сучасного випробувального обладнання ніколи не втрачає свого значення. Питання з розроблення нових підходів до підвищення вірогідності і точності вимірювання і контролю вібраційних сигналів завжди є одними з першочергових для вирішення вченими та інженерами, що пояснює актуальність даної роботи, яка полягає у необхідності подальшого удосконалення засобів і методів для забезпечення вимірювання у різних умовах експлуатації механізмів і машин, які піддаються впливу коливальних процесів.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Представлені у магістерській роботі результати виконано автором відповідно до плану навчання на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту ІФНТУНГ.

Ця робота виконана за безпосередньою участю автора як виконавця окремих розділів.

**За мету даної роботи** прийнято дослідження основних недоліків п'єзоелектричних акселерометрів, що викликані різними факторами і які потребують врахування при побудові нових удосконалених моделей п'єзоелектричних віброметрів.

**Задачі дослідження.** Для вирішення мети та задачі дослідження у магістерській роботі слід сформулювати наступні завдання: визначення ефективності перетворювачів, враховуючи поступлення енергії від коливального руху вимірювальним трактом перетворювача, розроблення схеми підключення перетворювача у вимірювальну схему з операційним підсилювачем та застосування корекції з метою розширення частотного діапазону приладу в цілому.

**Об'єктом дослідження** є процес вимірювання параметрів вібрації машин і механізмів.

**Предметом дослідження** є результати спостережень, що одержано в результаті аналізу роботи та п'єзоелектричних акселерометрів та принципів їх конструктивного рішення.

**Методи дослідження:** аналіз теоретичних знань, теорія вимірювань, методи математичної статистики і теорії ймовірності.

**Запропоноване практичне значення роботи і новизна** полягає у проведеному аналізі навчальної та наукової літератури та нормативних документів щодо технічних рішень, покладених в основу роботи п'єзоелектричних акселерометрів для вимірювання параметрів вібрації машин і механізмів. Результати роботи можуть бути використані у навчальному процесі на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту ІФНТУНГ.

# 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ

## 1.1 Вібрація, параметри вібрації. Основи віброметрії

Під вібрацією розуміють рух певної матеріальної точки або механічної системи, при якому по чергові збільшуються і зменшуються у часі значення величини, що характеризують цей рух [1].

«Віброметрія – сукупність засобів і методів вимірювання величин, що характеризують вібрацію» [1].

Такі визначення понять зазначено у нормативному документі, який встановлює основні терміни та визначення у галузі вібрації.

Чому виникає вібрація? Однозначно відповісти на це питання не є можливим, тому що будь-якому технологічному процесу, в якому беруть участь машини і механізми з приводами, притаманні коливання і вібрації, виключити які неможливо, а вплив на обладнання вони чинять. Тому фахівцям залишається контролювати і оцінювати вібрації, щоб, за можливості, тримати їх в певних межах.

Для контролю вібрацій застосовують засоби, які називають віброметрами. Вібрації машин оцінюють за певними показниками [2]: віброшвидкість у мм/с або у м/с, віброприскорення у  $\text{м/с}^2$ , вібропереміщення (як розмах коливання) у мкм.

Розглянемо кожен з показників. Віброшвидкість за суттю є коливальною швидкістю, яка характеризує переміщення (коливання з певною амплітудою і частотою) зазначеної точки у часі. У випадку з працюючими машинами і механізмами частіше вимірюють не максимальне значення віброшвидкості, а його середньоквадратичне значення. Цей параметр нормують для певних агрегатів і тому його можна вимірювати віброметрами.

Віброшвидкість вимірюють у широкому діапазоні частот від 1 до 1000 Гц, враховуючи тип і потужність обладнання, що діагностують.

Віброприскорення – це параметр, котрий характеризує вібрацію як взаємодію складових машин з середини. Саме від такої взаємодії складових машини і виникає вібрація, а такий показник не підлягає нормуванню, оскільки у кожної машини чи механізму він має індивідуальний характер, своє допустиме значення. Знаючи амплітуду сигналу руху від вібрації з його нульового значення до пікового, можна обчислити віброприскорення. Піки можуть мати як додатні, так і від’ємні значення, через що при розрахунку віброприскорення слід брати до уваги розмах амплітуди вібраційного коливання.

Динаміку зміщення точці контролю протягом процесу вібрації характеризує вібропереміщення, для визначення якого також беруть до уваги амплітуду вібраційного коливання і її розмах. Результати вимірювання вібропереміщення виражають як у мікрометрах, так і в міліметрах, мілсах і мілідюймах (1 мілс = 0.001 дюйма = 0.0254 мм).

Для гармонічного коливального процесу існує зв’язок між параметрами віброшвидкості  $V$ , віброприскорення  $a$  і вібропереміщення  $S$ , який визначається формулами, вказаними у [3]:

$$\begin{aligned} V &= 2\pi \cdot f \cdot S = a \cdot 10^3 / (2\pi \cdot f) \\ S &= V / (2\pi \cdot f) = a \cdot 10^3 / (2\pi \cdot f)^2 \\ a &= (2\pi \cdot f)^2 \cdot S \cdot 10^{-3} = 2\pi \cdot f \cdot V \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (1.1)$$

У виразах (1.1) розмірності параметрів:  $S$  – мкм;  $V$  – мм/с;  $a$  – м/с<sup>2</sup>.

Основним завданням і змістом віброметрії є вимірювання параметрів вібрації. Частіше застосовують термін моніторинг, або вібраційний моніторинг, а об’єктами такого моніторингу стають, у першу чергу, машини і механізми, оскільки вони є джерелом вібрації, тобто в них виникають коливальні сили. Іноді об’єктами вібромоніторингу стає обладнання, що не є джерелом, але по ньому розповсюджується чи передається коливання від іншого джерела. Завданням вібромоніторингу є визначення змін вібраційного

стану обладнання, тобто самих вібрацій, що розповсюджуються від джерела до встановлених точок контролю, що дає змогу запобігти аварійним ситуаціям та різного роду дефектам.

У віброметрії розрізняють поняття вібраційного моніторингу і вібраційної діагностики. На відміну від моніторингу вібродіагностика виявляє не зміни вібраційного процесу, а зміни у технічному стані об'єкта контролю, для якого існує загроза відмови протягом експлуатації.

Характеристики вібраційних процесів і параметри вібрації визначають з експериментальних даних за допомогою спеціальної вібровимірювальної апаратури. Дослідження параметрів вібрації здійснюють за двома принципами вимірювання – кінематичним і динамічним. Кінематичний принцип полягає у тому, що координати точок досліджуваного об'єкта вимірюють відносно обраної нерухомої системи координат, наприклад, нерухомих конструкцій випробувального стенда. Динамічний принцип заснований на вимірюванні параметрів вібраційного процесу відносно нерухомої системи відліку, частіше відносно центра тяжіння інерційного елемента давача. Тобто динамічний принцип вимірювання вібрації реалізовано за рахунок використання інерційної маси, закріпленої на пружному підвісі який при достатньо високих частотах вібрації зберігає інерційний елемент у стані спокою [4].

Реалізувати зазначені принципи вимірювання можна за допомогою контактних і безконтактних методів вимірювання. Оскільки давачі, що застосовують для реалізації засобів вимірювання, на виході мають сигнал порядку декілька десятків вольт, то вихід давача підключають до підсилювача з метою нормування сигналу вимірювальної інформації, а потім подається на вхід пристрою реєстрації.

Пристрій реєстрації подає вимірювальну інформацію у вигляді, зручному для спостерігача, але не здійснює попередньої обробки сигналу, який фіксується у запланованому вигляді чи у пам'яті ЕОМ.

## **1.2 Аналіз методів і засобів вимірювання вібрації**

### 1.2.1 Аналіз методів вимірювання і обробки результатів вібродіагностики

Методи вібраційної діагностики стали основою для функціональної діагностики незалежно від режиму роботи машин і механізмів.

Більш інформативним стане наведений аналіз методів вібродіагностики, якщо розглядати його у прив'язці до електричних машин, які є більш вираженим джерелом коливальної сили, що може проявлятися у лінійних і нелінійних процесах.

Вібродіагностика машин і механізмів здійснюється віброакустичним методом контролю, в основі якого є здійснення аналізу шумових характеристик і характеристик вібрацій. У залежності від того, яка сама проводиться діагностика, чи тестова, чи функціональна, залежатиме вибір методу діагностики.

Для тестового контролю вже з самої назви методу слідує, що необхідно штучно створити збурення із певними заданими характеристиками, які створюють чи генерують цю вібрацію. Вібрація змінює свої характеристики протягом тестування, і за змінами характеристик вже роблять висновок про технічний стан обладнання. Тестовий режим діагностики можна здійснювати і в робочому, і в неробочому режимах машин [5].

У випадку проведення функціонального методу вібродіагностики досліджуваній об'єкт має перебувати у робочому стані, тобто працювати за призначенням у різних режимах роботи з можливим порівнянням віброакустичних сигналів у таких режимах [5].

Але будь-який метод переслідує мету одержання інформації про реальні параметри вібрації машин і механізмів, що може бути покладено в основу проведення аналізу про технічний стан.

Першим методом, який розглядатиме – це метод спектрального аналізу. Цей метод по суті являє собою математичний апарат, який реалізують для

дослідження періодичних процесів і виявлення в них окремих компонент, що мають певні характерні частоти [6].

Цей метод застосовують в разі потреби дослідити структуру вібрації. Метод є інформативний, діагностичну інформацію одержують з таких параметрів як період і амплітуда коливань. Для такого методу необхідні дуже чутливі елементи у давачах, і тому частіше застосовують п'єзоелектричні. Перевагою методу є те, що він дозволяє виявити дефект на ранній стадії, а це попереджає виникнення аварійних ситуацій. Як недолік можна відмітити складну апаратуру для реалізації методу.

Другий метод – спектральний аналіз огинаючої. Цей метод дозволяє діагностувати дефекти у стадії зародження. Метод досить завадостійкий і точний, що пояснює його популярність. Реалізація методу полягає в аналізі високочастотних вібрацій, які є в просторі поблизу джерела.

Спектральний аналіз вважають відносним вимірюванням. Він дозволяє визначити глибину модуляції, що відповідає розміру дефекту, а за частотою модуляції визначають вид дефекту [7].

Перевагою методу є можливість визначення локації дефекту, його виду і розмірів.

Чутливими елементами засобів за таким методом діагностики є п'єзоелектричні і тензорезистивні.

Для контролю дефектів, які тільки зароджуються і ще не викликають збільшення рівня вібрації, що не є відсотковим фактом відсутності дефекту, застосовують метод ударних імпульсів. Дефект, що зароджується, викликає появу ударних імпульсів високої частоти, а це збільшує пікові значення у високочастотних сигналах вібрації. Вимірювання таких піків і є задачею цього методу.

Високу чутливість методу однозначно можна вважати його перевагою, а от недоліком вважається те, що не всі дефекти, що тільки зароджуються, мають той ударний інформативний імпульс й інформація про вид дефекту

відсутня. Тому цей метод застосовують не для діагностики, а для контролю [6].

Наступний метод – Вайвлет-аналіз. Цей метод розглядають як окремий метод обробки вібросигналів. Розрізняють два види аналізу – дискретний і безперервний для аналізу дискретних і безперервних сигналів відповідно. Вібросигнали, одержані за таким методом, аналізують у двох просторах, як би відбувається математична візуалізація, що привело до назви метода – математичний мікроскоп. Обробку інформації проводять за допомогою різних програм: Matlab, MathCad, Mathematica, LabView.

Перевагою методу є висока інформативність, а недоліком – трудомісткі процедури обробки і представлення результатів контролю, що вимагає складного обладнання [7].

Технічно цей метод реалізовано у вигляді віброаналізатора.

П'ятим методом слід назвати аналіз загального рівня вібрації, який полягає у вимірюванні загального рівня вібрації. У широкому частотному діапазоні вимірюють основні параметри вібрації: віброзміщення, віброприскорення і віброшвидкість досліджуваних механічних коливань. Даний метод не є високоточним щодо визначення технічного стану машин і механізмів, тому його застосовують більше для контролю ніж для моніторингу чи діагностики. Для реалізації методу застосовують віброаналізatori і віброметри, де чутливими елементами можуть бути п'єзоелектричні, індукційні, тензорезистивні і вихроструміві перетворювачі [8].

І, на решті, останній метод – це метод прямого спектра. За цим методом аналізують дані з віброаналізатора, де інформативними даними є частотний спектр, де спостерігають сплески амплітуди, котрі виникають при наявності дефекту. Кожному виду дефекту відповідає тільки йому притаманна у спектрі гармоніка певної амплітуди.

Переваги даного методу: заводо захищеність і інформативність. До недоліків можна віднести неможливість виявити дефект, що зароджується, а прилади за таким методом мають високу вартість.

З перелічених методів вібраційної діагностики і контролю найоптимальнішим є метод спектрального аналізу.

Аналіз перетворювачів у складі приладів показав, що кращі показники продемонстрували п'єзоелектричні перетворювачі, оскільки не вимагають додаткового джерела живлення, мають чітко виражений характер перетворення, мають високу чутливість.

Наведемо інформацію про засоби вимірювання вібрації, що застосовують у промисловості, транспорті та будівництві для моніторингу стану та діагностики несправностей машин і механізмів.

### 1.2.2 Аналіз засобів вимірювання вібрації

Технологія моніторингу стану (Condition Monitoring, CM) та діагностики несправностей (Fault Diagnosis, FD) є сучасною інновацією в електронній сфері, яка стрімко розвивається для задоволення потреб модернізованого промислового виробництва. Вона необхідна для керування великомасштабними, безперервними, високошвидкісними та автоматизованими машинами й механізмами.

Коли такі технології почали активно розроблятися особливо з 1970-х років, вони стали вирішальними у забезпеченні безпеки експлуатації обладнання, оптимізації витрат на обслуговування, а також у запобіганні забрудненню довкілля через можливі екологічні катастрофи при руйнуванні обладнання у хімічній та нафтогазовій промисловості.

Впровадження CM та FD принесло значні економічні вигоди, які проявляються у різкому зниженні кількості несподіваних поломок (раптових несправностей) обладнання та скороченні витрат, пов'язаних із технічним обслуговуванням.

В Україні дослідження та впровадження технологій контролю стану та діагностики несправностей активізувалися наприкінці 1980-х років, що було зумовлено переходом до сучасної концепції превентивного або прогностичного обслуговування (Predictive Maintenance, PdM) [8].

За останні двадцять років ця технічна галузь в нашій країні продемонструвала стрімкий прогрес у дослідженнях, розробці та практичному застосуванні. Особливо поширеними стали технології виявлення вібрацій завдяки сучасним методам вимірювання, простоті та легкості реалізації.

Наведемо приклади окремих засобів вимірювання і моніторингу вібрації, які знайшли широкого використання на підприємствах України, користуючись рекламною інформацією [9].

Віброметр WALCOM VM-6360.

Віброметр WALCOM VM-6360 являє собою портативний мікропроцесорний пристрій, який здатний вимірювати декілька параметрів вібрації. Даний пристрій застосовують на різних промислових об'єктах. Також віброметр WALCOM VM-6360 придатний для застосування у польових умовах.



Рисунок 1.1 – Мікропроцесорний віброметр WALCOM VM-6360.

Перелічимо переваги віброметра WALCOM VM-6360 [9]:

- характеристики, які підлягають комплексному одночасному вимірюванню: швидкість, прискорення, зміщення, обертання та частота;
- за необхідності до даного пристрою можна підключати додатковий зовнішній давач, який замовляють окремо;
- пристрій працює і забезпечує високу чутливість у широкому діапазоні частот;
- енергонезалежний, не потребує джерела напруги 220 В;
- через простий сценарій кнопочового управління пристроєм та просту його конструкцію персонал швидко навчається роботі з засобом безпосередньо на робочому місці;
- висока точність і хороша роздільна здатність є запорукою прийняття правильного рішення у виборі і зміні параметрів технологічного процесу, а також у заміні обладнання чи зміні його експлуатаційних режимів;
- для передачі даних про виміряні параметри передбачено роботу з персональним комп'ютером. Спеціальне програмне забезпечення додається у комплекті;
- пристрій забезпечує фіксацію поточних значень та запам'ятовування максимального значення за період вимірювання (HOLD);
- наявність індикатора, що показує рівень заряду джерела живлення;
- при припиненні роботи протягом 5 хвилин відбувається автоматичне вимкнення пристрою для забезпечення економії заряду батарей.

Область застосування – це виробництво, а саме: вібраційний контроль машин та механізмів з метою виявлення негативних проявів, дефектів, які тільки зароджуються і з часом можуть призвести до руйнування з подальшими фінансовими втратами. Завданням такого контролю на виробництві є виявлення на початковому етапі такого рівня вібрації, який є небезпечним. Вимірювані величини, що характеризують вібраційний процес у таких випадках дуже малі, але чутливий віброметр здатний виявити достатньо просто.

З технічними характеристиками віброметра WALCOM VM-6360 можна ознайомитися у табл. 1.1[9]:

Таблиця 1.1. – Технічні характеристики віброметра WALCOM VM-6360

| Характеристика                           | Пояснення, значення  |
|--|--|
| Давач                                    | П'єзоелектричний акселерометр  |
| Швидкість коливань                       | 0.1-400.00 мм/с, 0.000-16.00 inch/c<br>Частотний діапазон: 10Гц до 1кГц  |
| Прискорення коливань                     | 0.01-400 м/с <sup>2</sup> , 0.1-200 м/с <sup>2</sup> , 0.3-1312 ft/s <sup>2</sup><br>Частотний діапазон:<br>10 Гц - 1 кГц в режимі 1,<br>10 Гц - 10 кГц в режимі несення |
| Зсув                                     | 0.001-4.00 мм, 0,04-160.0 mil<br>Діапазон частот: 10 Гц - 1 кГц  |
| Обертання                                | 60-99990 (об/хв)   |
| Частота                                  | 1-20 кГц   |
| Точність                                 | <5% +2 цифри   |
| Інтерфейс                                | RS232  |
| Максимальне значення                     | +  |
| Утримання (HOLD)                         | +  |
| Автоматичне вимкнення                    | +  |
| Роздільна здатність                      | 0,01 (мм/с <sup>2</sup> ), 0,1 (мм/с <sup>2</sup> ), 0,001 (мм), 1 (об/хв)   |
| Умови, за яких відбувається експлуатація | температура 0 ~ 40 °С , вологість не вище 90% RH   |
| Живлення від джерела                     | 4 x 1,5 ААА батарейки  |
| Габаритні розміри                        | 124 x 62 x 30 мм   |
| Маса                                     | 120 г  |

Віброметр Walcom VM-6380.

Віброметр Walcom VM-6380 – незамінний прилад для вимірювання параметрів вібрації, яка генерується від механічних агрегатів, що мають рухомі елементи (вимірювані параметри вібрації: вібраційна швидкість, прискорення, амплітуда зміщення і частота). Віброперетворювач складає основу даного приладу. Як і більшість таких приладів Walcom VM-6380 у

своїй роботі одержує електричний сигнал – наругу в результаті прямого п'єзоелектричного ефекту, що полягає у генерації заряду на поверхнях п'єзокристала давача пропорційного механічному стисненню від вібраційних коливань..

Основні особливості роботи і обслуговування віброметра Walcom VM-6380 наступні [9]:

Давач кріпиться до об'єкту за трьома варіантами – на магнітах, на болтовому з'єднанні та ручному триманні зонда оператором.

Використовується інтерфейс RS232 і Bluetooth.

Застосовуються давачі трьох видів:

- трикоординатний стаціонарно монтований;
- ручний гольчастий конічний та сферичний зонди.

Є варіант підключення навушників, що дозволяє працювати у режимі стетоскопа.

Своєчасне і належне використання віброметра VM-6380 дозволяє оптимізувати ремонтні роботи та роботи з технічного обслуговування агрегатів, що мають обертові механізми [9].

Відповідно до вимог нормативних документів [10] або [11] для оцінки надійності та визначення технічного стану машин і механізмів є достатнім одержати середньоквадратичне значення вібраційної швидкості. Такий підхід застосовують для контролю якості продукції на різних стадіях життєвого циклу, за такою методикою оцінюють якість продукції відразу після виробництва, а потім – для визначення реального технічного стану вже протягом експлуатації, щоб мати можливість правильно спланувати ремонтні роботи і періодичність технічного обслуговування.

Реалізація таких заходів потребує наявності відповідних технічних засобів, серед яких варто назвати трьохкоординатний вимірювач вібрації нового покоління VM-6380.



Рисунок 1.2 – Віброметр Walcom VM-6380

За своєю конструкцією прилад є переносний, зручний і оперативний у використанні і має у своєму складі два блоки – основний блок і виносний давач. На його передній панелі розташовані кнопки для керування роботою приладом, а також LCD-дисплей, який показує такі параметри і сигнали [9]:

- вимірне значення потрібної величини;
- індикацію параметра, що вимірюють: віброшвидкість, прискорення, амплітуда зміщення;
- одиницю вимірювання величини;
- режим, коли відбувається утримання максимального значення;
- індикацію трьохосьового вимірювання;
- індикацію вимірювання по осі X;
- індикацію вимірювання по осі Y;
- індикацію вимірювання по осі Z;
- рівень заряду батареї;
- індикацію включення автоматичного вимкнення приладу.

У конструкції приладу передбачено можливість підключення високоомних навушників, для чого є відповідний коаксіальний роз'єм, а також DB роз'єм або USB для підключення комп'ютера.

### Основні функції приладу [9]:

1. Вимірювання віброшвидкості, віброприскорення та амплітуди зміщення;
2. Можливість окремо здійснювати вимірювання по осях X,Y,Z;
3. Здійснення тривимірного загального вимірювання XYZ;
4. Можливість моніторингу завдяки запам'ятовуванню вимірювальної інформації на зовнішній пам'яті приладу;
5. Аналіз шумів через прослуховування та запис їх на зовнішньому носії;
6. Даний прилад передбачено для роботи у складі вимірювальної системи.

Технічні і метрологічні характеристики вимірювача вібрації VM-6380 наведено у табл. 1.2 [9].

Таблиця 1.2.– Характеристики вимірювача вібрації VM-6380

| Характеристика       | Пояснення, значення   |
|----------------------|---|
| Прискорення вібрації | Діапазон вимірювань: 0,1~400 м/с <sup>2</sup> , 0,0~40 g,<br>еквівалентний пік<br>Діапазон частот: 10 Гц~1 кГц / 10 Гц~10 кГц |
| Швидкість вібрації   | Діапазон вимірювань: 0,01~400 мм/с TRMS<br>Діапазон частот: 10 Гц~1 кГц   |
| Зміщення             | Діапазон вимірювань: 0,001~4,0 мм, еквівалентний пік<br>Діапазон частот: 10 Гц~1 кГц  |
| Точність приладу     | 5% від ІВ ±2 емп  |
| Функції приладу      | автоматичне вимкнення, утримання макс. значення,<br>індикатор розряду батарей   |
| Аналоговий вихід     | 0~2,0 В АС пік (опір навантаження: <10 кОм)   |
| Цифровий вихід       | USB, RS-232   |
| Давач вібрації       | тривимірний п'єзоелектричний акселерометр   |
| Дисплей              | Рідинно-кристалічний  |
| Живлення             | 2 батареї 1,5 В АА (UM-3)   |
| Умови експлуатації   | Температура: 0~50 °С  |

|                               |   |
|-------------------------------|---|
|                               | Відносна вологість не більше 90%  |
| Габарити                      | (130x76x32) мм  |
| Маса приладу                  | 340 г (без батарей)   |
| Комплект поставки             | - Віброметр,<br>- магнітний наконечник,<br>- датчик п'єзоелектричний тривимірний,<br>- зонд (конічного виконання),<br>- зонд (сферичного виконання),<br>- футляр для переміщення,<br>- настанова з експлуатації |
| Додаткові комплектні пристрої | - навушники,<br>- кабель USB, RS-232 з ПЗ   |

PCE – VD3 – реєстратор вібрацій.



Рисунок 1.3 – Вигляд реєстратора вібрацій PCE-VD3

Віброметр PCE-VD3 призначений для реєстрації даних та має можливість їх передавати на комп'ютер (ПК). Прилад відрізняється малими розмірами і для кріплення – установки оснащений магнітом. Такий прилад легко можна встановити на будь-яку металеву поверхню без пошкодження. Також прилад можна закріплювати на поверхні об'єкта контролю гвинтами, якщо це передбачено технологією контролю.

Прилад має давач 3-х осьовий (X, Y, Z осі) і придатний для вимірювання навантаження в діапазоні від –18 до + 18 g. Віброметр повністю адаптований для роботи з персональним комп'ютером і виконаний у вигляді USB накопичувача. Прилад для роботи не потребує ніяких додаткових кабелів. Технічні характеристики віброметра PCE-VD3 наведено у табл. 1.3 [9],

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики віброметра PCE-VD3

| Характеристика   | Пояснення, значення  |
|--|--|
| Перевантаження   | -18...+18 g  |
| Частота  | 0...60 Гц  |
| Точність   | ±0,5 g   |
| Крок здійснення вимірювання  | 0,00625 g  |
| Запис про виміряні дані:<br>Кількість записів<br>Інтервал, з яким здійснюється запис | 4 Мбіт (85764 замірів)<br>50 мс...до 24 годин  |
| Живлення приладу   | аккумулятор змінний Li-Ion 3,6 В<br>ресурс – близько 1000 годин  |
| Робочі кліматичні умови<br>Умови зберігання  | 0 ... +40°C при вологості 10...90%<br>10 ... +60°C при вологості 10...75%  |
| У комплект поставки входять:   | віброметр PCE-VD 3 – 1;<br>програмне забезпечення – 1;<br>кронштейн – 1;<br>аккумулятор – 1;<br>гвинта – 1;<br>інструкція по експлуатації – 1. |

PCE-VS 10 монітор вібрацій. Такий засіб передбачено використовувати для проведення вимірювання і контролю таких параметри вібрації: прискорення, швидкість вібрації. Вібраційний монітор PCE-VS 10 знайшов дуже широке застосування. Частіше за все його можна зустріти серед засобів діагностики і контролю стану двигунів і машин, вентиляторів, насосів і компресорів. Здатність здійснювати індикацію стану машин дозволяє застосовувати такий монітор вібрацій для перевірки поступлення матеріалів та товарів при їх прийомі на виробництві.

Все більше і більше різних ситуацій з вимірювання параметрів коливального руху потребує застосування вібровимірювача, з якими він здатний справитися. Його застосовують для аварійного відключення виробничих установок, щоб вчасно уникнути сильних вібрацій, які можуть привести до пошкодження устаткування і нанести шкоду персоналу. На різних транспортних засобах у тому числі рейкових віброметр також застосовують як аналізатор вібрації, добре себе зарекомендував цей прилад і на воротах і дверях як запобіжний вимикач [9].



Рисунок 1.4 – Монітор вібрацій PCE-VS10

З характеристиками монітору вібрацій PCE-VS10 можна ознайомитися у [9] та табл. 1.4.

| Характеристика       | Пояснення, значення   |
|----------------------|---|
| Діапазон вимірювання | Прискорення 0,1...1000 м/с <sup>2</sup>                       |
| По вібрації          | Фільтр ефективного / пікового значення по прискоренню         |
| По частоті           | ФВЧ: 0.1 / 2/5/10/20/50/100/200/500/1000 Гц<br>по прискоренню |
|                      | ФНЧ: 2/5/10/20/50 Гц<br>по віброшвидкості                     |
|                      | Фільтр ефективного / пікового значення по віброшвидкості      |
|                      | ФВЧ: 0.1 / 0.2 / 0.5 / 1/2/5/10 кГц<br>по прискоренню         |

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
|                                    | ФНЧ: 1 кГц по віброшвидкості   |
| Характеристики виходів             | Вихід релейний:<br>PhotoMOS реле<br>SPST;<br>макс. 60V / 0.5 A (AC / DC)<br>Підключення здійснюється до гвинтових клем   |
| Здійснювані функції та особливості | 60 частотних діапазонів<br>п'єзоелектричні акселерометри<br>водонепроникність до IP67<br>функція для калібрування з кнопкою перемикання порогового значення)<br>корпус міцний, з алюмінію<br>проста збірка з нарізним штифтом M8<br>здійснюється моніторинг ефективного або/і пікового значення швидкості або прискорення механічних коливань за середньоквадратичним значення<br>сигналізація візуальна через LED червоного або зеленого кольору<br>є сигнал тривоги з параметрами:<br>час затримки сигналу 0 ... 99 сек.<br>час утримання сигналу 0 ... 9 сек.<br>Пристрій налаштовують за допомогою вбудованого USB порту |
| Живлення монітору вібрацій         | 5...30 V DC<br>5V DC USB   |
| Поставка у комплекті:              | монітор вібрацій PCE-VS10 – 1;<br>програмне забезпечення – 1;<br>USB кабель – 1;<br>інструкція по експлуатації – 1.  |

Аналіз та перелік сучасних засобів можна продовжувати і далі, але з наведеного можна зробити висновок, що на сучасному ринку засобів вимірювання представлений широкий спектр різноманітних засобів, здатних забезпечити вимірювання та моніторинг параметрів вібрації на різних об'єктах для різних умов експлуатації.

На наступному етапі досліджень слід проаналізувати, якими типами представлені перетворювачі вібрації в різних засобах віброметрії, і на яких фізичних ефектах заснований їх принцип дії.

### 1.2.3 Аналіз давачів для засобів вимірювання параметрів вібрації

Перетворювачі вібрації, які знайшли широке застосування у технічних галузях, дія яких заснована на різних фізичних принципах, реалізовані у різних типах.

Класифікацію перетворювачів за принципом дії показано на рис. 1.5,



Рисунок 1.5 – Класифікація перетворювачів за принципом дії

Генераторні перетворювачі забезпечують пряме перетворення механічної енергії на електричний сигнал безпосередньо.

Приклади таких пристроїв включають вимірювальні перетворювачі, які використовують:

- Ефект Холла;

- П'єзоелектричний ефект;
  - Принцип електромагнітної індукції;
- та інші подібні принципи.

Параметричні перетворювачі — це пристрої, в яких вхідні механічні величини впливають на зміну електричних характеристик їхніх схем. Змінюються такі електричні параметри, як:

- Опір (резистивні);
- Ємність (ємнісні);
- Індуктивність (індуктивні);
- Частота коливань тощо.

Особливістю параметричних вимірювальних пристроїв полягає в їхній потребі у зовнішньому джерелі живлення та наявності демодуляторів або схем обробки, які реєструють зміну електричних параметрів. Конкретні назви перетворювачів вказано у схемі рис. 1.5.

Параметричні давачі застосовуються в віброметрії менше, ніж генераторні. Це пояснюється тим, що вимірювальні схеми, в які вони включаються, виявляються складнішими – потрібно джерело живлення, демодулятор. У той же час є одна область, де дані типи перетворювачів принципово не можуть бути замінені генераторними – це вимірювання статичних прискорень. Тут найбільш зручними виявилися індуктивні перетворювачі [4, 12].

Також відомі у віброметрії перетворювачі з використанням перетворення в проміжну фізичну величину. Тут можна назвати перетворювачі з використанням світлової енергії допоміжного джерела – фотоелектричні, перетворювачі з використанням звукової енергії і, нарешті, перетворювачі з використанням, в якості проміжного посередника теплової енергії, наприклад болометричні [4, 13, 14].

За певних конструктивних та схемотехнічних рішень майже всі фізичні ефекти, що викликають з появу електричної або магнітних активних величин під дією механічних впливів, можна використовувати в віброметрії.

Перевага, очевидно, повинна бути віддана тим, які мають по можливості великий коефіцієнт корисної дії, характеризуються високою стабільністю, легко технічно реалізуються в умовах вібродавачів, також мають малі габарити і масу, придатні до експлуатації у широкому діапазоні температур, що є неодмінно визначним для застосування у вібровимірювальних приладах. Нарешті, доводиться враховувати економічні фактори, пов'язані з вартістю отриманого перетворювача і терміном його служби. За сукупністю цих якостей найкращими для віброметрії виявилися п'єзоелектричні перетворювачі [13, 14] та п'єзоелектричні акселерометри з вихідним сигналом по напрузі [15].

Інформація та каталоги п'єзоелектричних давачів та п'єзоелектричних акселерометрів для широкого застосування у віброметрії можна знайти у [16, 17]. Характеристики вказаних давачів, їх переваги та недоліки досліджуватиме у наступному розділі магістерської роботи.

## **2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕВАГ ТА НЕДОЛІКІВ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАСОБІВ ВІБРОМЕТРІЇ**

### **2.1 Принцип роботи п'єзоелектричного акселерометра**

П'єзоелектричні акселерометри – це давачі, що призначені для вимірювання прискорення об'єкта, який перебуває у стані коливального руху, тобто такий прилад, що здатний сприймати і перетворювати інформацію про прискорення у форму, що підлягатиме подальшому використанню. Принцип роботи такого п'єзоелектричного вимірювача прискорень – прямий п'єзоефект, який полягає у здатності певних матеріалів (п'єзоелектриків) генерувати електричний заряд під дією на них механічних сил [4, 13].

Через відсутність рухомих частин у конструкції таких перетворювачів відсутній знос, а це дозволяє стверджувати про довговічність таких перетворювачів. За результатами обробки вихідного сигналу перетворювача

можна оцінювати і аналізувати швидкість механічних коливань, а також їх зміщення.

Перетворювачі вимірювання переміщень мають і недоліки, основним з яких є неможливість вимірювання постійної складової динамічного процесу [4]. Більш детально недоліки буде розглянуто окремо.

Через набутий досвід експлуатації різних перетворювачів для контролю і вимірювання параметрів вібрації частіше стали застосовувати такі засоби вимірювання з наступними характеристиками [8,12]:

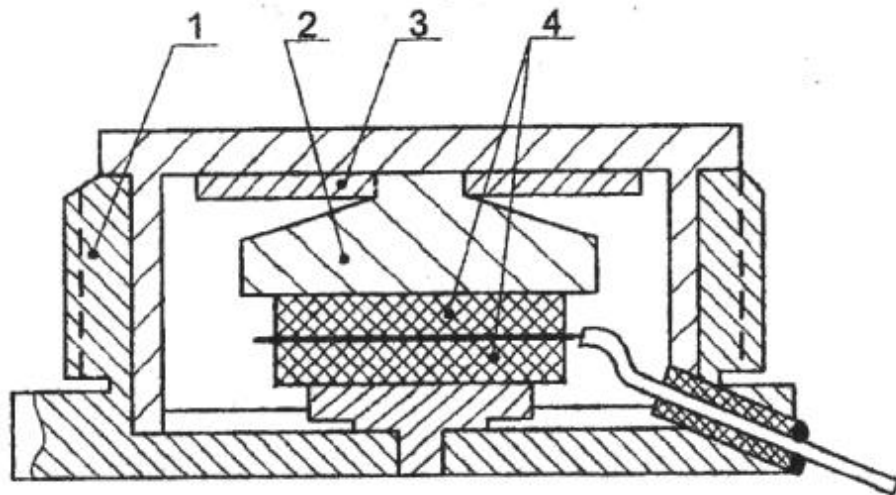
- належну точність і достатню швидкодію;
- здатність працювати у різних умовах експлуатації;
- нескладне конструктивне виконання.

Таким вимогам відповідають перетворювачі вимірювання переміщень, робота яких заснована на п'єзоелектричному ефекті, який є прямим [4]. Виходячи з цього для вимірювання та моніторингу таких параметрів вібрації як швидкість і прискорення варто застосовувати п'єзоелектричні акселерометри [15].

Спочатку треба з'ясувати, чому п'єзоелектричні акселерометри набули такої популярності серед давачів вібрації. Основна причина полягає у тому, що ці давачі є простими за своїм конструктивним виконанням, а чим простіше, тим засіб є надійнішим. Також п'єзоелектричні акселерометри мають високу чутливість, лінійну характеристику у достатньо широкому діапазоні динамічних вимірювань, широкий частотний діапазон і хорошу стабільність роботи при різних впливових зовнішніх факторах. Також привабливою є невисока вартість, малі габарити та маса.

Саме п'єзоелектричні акселерометри займають перше місце для вирішення задачі контролю змінних коливальних процесів, які відбуваються у машинах і більшості механізмів, і успішно реалізовані у засобах віброметрії.

Розглянемо конструктивну схему давача на основі акселерометра п'єзоелектричного і опишемо його роботу.



1 – корпус давача ; 2 – інерційна маса акселерометра; 3 – мембрана з'єднувальна; 4 – пластини з п'єзоелектричного матеріалу

Рисунок 2.1 – Акселерометр п'єзоелектричний. Конструктивна схема

Робота такого давача полягає у тому, що вимірювання вібрації і прискорення відбувається за створеною силою інерції протягом коливання, яка зміщує інерційну масу 2 у корпусі 1, котрий кріпиться до об'єкту, вібрацію якого оцінюють. П'єзоелектричні пластини у той час стають затисненими між масою 2 і корпусом 1 мембраною 3. Від ступені затиснення на обкладинках п'єзопластин генерується струм, який буде пропорційний до величини прискорення. Цей струм реєструється і результат вимірювання може виводиться на самописний пристрій або ЕОМ.

Як відомо з [4, 12, 13] кількість електрики, що виникає на поверхнях п'єзопластин дуже мала і має здатність витікати, тобто пропадати, тому слід застосовувати електростатичний екран – у випадках потужного зовнішнього електричного поля, або підсилювач – щоб витік зарядів з п'єзоелемента через вимірювальну схему був якомога меншим.

Слід зазначити, що у п'єзоелектричних приладів необхідно вимірювати не сам заряд  $Q$ , а напругу  $U$ , яка виникає на ємності, що утворена обкладинками пластин [12]:

$$U = \frac{Q}{C}, \quad (2.1)$$

де  $C$  – власна ємність п'єзопластини;

тоді для конкретного давача певних розмірів можна записати такий вираз:

$$U = \frac{\varepsilon S_x}{d}, \quad (2.2)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична стала матеріалу п'єзопластини;  $S_x$ ,  $d$  – відповідно площа поверхні та товщина взятої п'єзопластини.

Щоб визначити значення напруги у момент прикладання сили  $F_x$ , викликаной силою інерції від вібрації і прискорення, необхідно значення  $C$  і  $Q$  підставити у вираз (2.1):

$$U = \frac{k1dF_x}{\varepsilon S_x}. \quad (2.3)$$

Для забезпечення оптимального режиму роботи давача у реальних умовах експлуатації застосовують спеціальні вимірювальні схеми з підключенням до його власної ємності ще ємності вхідного кола підсилювача  $C_{ex}$  і ємності з'єднувального кабелю  $C_k$ . Тоді напруга, яку генерує перетворювач за (2.1), зменшиться і буде дорівнювати

$$U = \frac{Q}{C + C_{BX} + C_K}. \quad (2.4)$$

Формули (2.1) – (2.4) дозволяють визначитися з основними конструктивними параметрами акселерометра п'єзоелектричного для його роботи з вимірювання вібрації і прискорення.

Розглянемо схему і принцип роботи п'єзоелектричного акселерометра фірми Brüel & Kjær (Брюль і К'єра).

Акселерометри компанії Brüel & Kjær мають хорошу чутливість, високе відношення сигнал/шум і широку смугу пропускання. З такими характеристиками акселерометри компанії Brüel & Kjær є придатними як для вимірювань загального призначення, так і для вимірювання коливань високої

частоти. Такі акселерометри характеризуються високою продуктивністю і, в порівнянні з стандартними п'єзоелектричними акселерометрами, що не мають інтегральних підсилювачів, великою вихідною чутливістю. Конструкція таких приладів герметична і повністю захищена від зовнішнього бруду та від радіочастотного та електромагнітного випромінювання [19].

Схему п'єзоелектричного акселерометра фірми Brüel & Kjær показано на рис. 2.2

У такого акселерометра роль пружин, що механічно з'єднані з основою стійки, яка має трикутний переріз і три інерційні маси, покладено на активні частини, котрі виготовлені з п'єзоелектричного матеріалу.

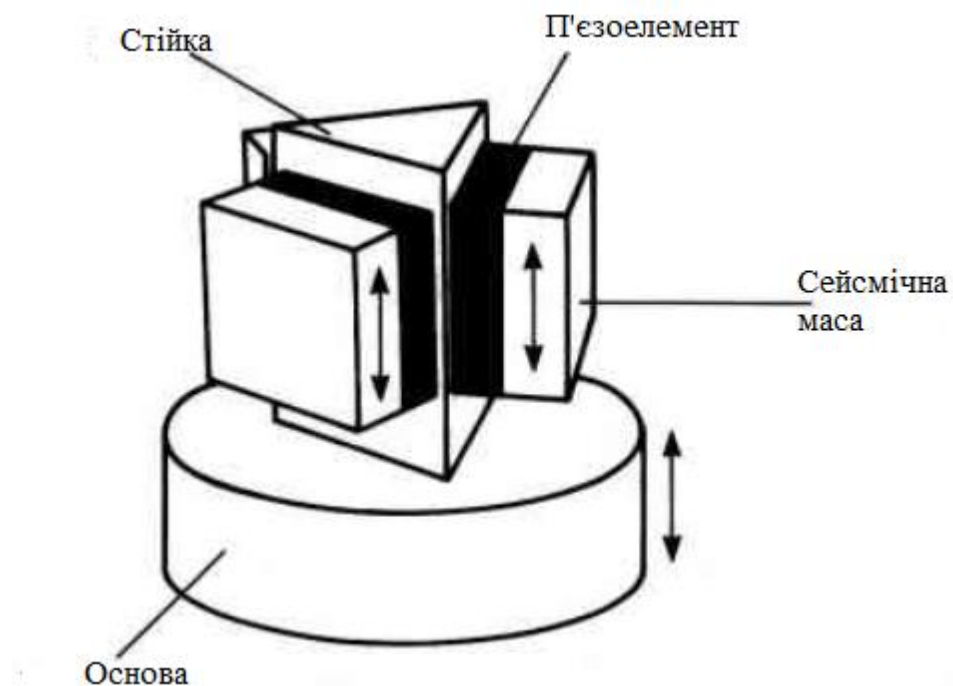


Рисунок 2.2 – Спрощена схема п'єзоелектричного акселерометра фірми Brüel & Kjær

Коливання, які контролюють за допомогою такого п'єзоелектричного акселерометра, діють на основу акселерометра. Це спричиняє дію динамічної сили на кожен п'єзоелемент, яка дорівнюватиме добутку прискорення інерційної маси на масу основи акселерометра. П'єзоелементи при цьому генерують електричний заряд, що пропорційний силі, яка на них діє.

Інерційні маси протягом вимірювання не змінюються, а це означає, що згенерований заряд на електродах п'єзоелементів буде пропорційний прискоренню цих інерційних мас. Виходячи з того, що прискорення інерційних мас має амплітуду і фазу ідентичну амплітуді і фазі прискорення основи акселерометра, можна однозначно стверджувати, що загальний згенерований електричний заряд буде пропорційний прискоренню його основи, а значить і прискоренню механічних коливань поверхні, на котру акселерометр встановлено. Основні характеристики п'єзоелектричних акселерометрів типів 4312, 4313, 4314, 4315 фірми Brüel & Kjær наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики п'єзоелектричних акселерометрів

| Параметри   | Тип акселерометра |                   |                  |                  |
|---|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
|   | 4312              | 4313              | 4314             | 4315             |
| Чутливість, мВ/g  | 40-60             | 10-20             | 40-60            | 10-20            |
| Власна частота, кГц   | 45                | 60                | 45               | 60               |
| Частота резонансу з<br>урахуванням кріплення, кГц           | 30                | 45                | 25               | 40               |
| Ємність, з кабелем включно, пФ                              | 1000              | 1000              | 1000             | 1000             |
| Бокова чутливість, %  | 4                 | 4                 | 4                | 4                |
| Максимальна температура, °С                                 | 260               | 260               | 260              | 260              |
| Температурний коефіцієнт<br>чутливості, дБ/°С               | 0,02              | 0,02              | 0,02             | 0,02             |
| Опір витоку,<br>МОм   | 20 000            | 20000             | 20 000           | 20000            |
| Чутливість до магнітного поля,<br>мкВ/Гс                    | 1                 | 1                 | 1                | 1                |
| Чутливість до звуку, мкВ/бар                                | 0,2               | 0,2               | 0,2              | 0,2              |
| Максимально допустимий<br>ударне прискорення, g             | 7000              | 10000             | 7000             | 10000            |
| Максимально допустиме<br>періодичне прискорення, g          | 100               | 200               | 100              | 200              |
| Частотний діапазон, кГц<br>з похибкою 5%<br>з похибкою 1 дБ | 2-6000<br>2—10000 | 2—9000<br>2—15000 | 2—5000<br>2—5000 | 28000<br>2—10000 |

|            |    |    |    |    |
|------------|----|----|----|----|
| маса, г    | 30 | 13 | 30 | 13 |
| Висота, мм | 22 | 16 | 26 | 20 |

## **2.2 Аналіз роботи п'єзоелектричного акселерометра під впливом зовнішніх факторів**

Напевно доцільніше розглянути спочатку, які фактори впливають на роботу п'єзоелектричного акселерометра, щоб зрозуміти той, що чинить найбільший вплив на роботу приладу.

Приділимо спочатку увагу аналізу впливу оточуючого середовища, у якому проводять вимірювання.

З'ясуємо, як впливає температура на п'єзоелектричні матеріали. Виявляється, всі п'єзоелектричні матеріали залежать від температури [20], точніше – зміна температури призводить до зміни чутливості п'єзоелектричного акселерометра. При високих температурах у п'єзоелектричних матеріалів спостерігається деполяризація, яка змінює чутливість давача назавжди. Для температур від 196°C до 482°C виготовляють акселерометри з спеціальними п'єзоелектричними матеріалами [19].

При вимірюванні низькочастотних вібрацій навіть невеликі зміни температури викликають змінний вихідний сигнал. Процес називають перехідним температурним процесом. Якщо температура об'єкта вище 250°C, то застосовують тепловідводи між основою акселерометра і поверхнею об'єкта. Такі тепловідводи дозволяють проводити вимірювання за реальною температурою об'єкта до 400°C [19].

Шум кабелю акселерометра, який виникає через високий вихідний опір, може викликати шуми в приладі. Причиною цього можуть бути електромагнітні завади та ін., наприклад, струм в екранах кабелів заземлення чи трибоелектричний шум, який часто наводиться в кабелі акселерометра через звичайний механічний рух кабелю протягом процедури вимірювання.

Рішення – застосування кабелю з графітовим покриттям, а щоб уникнути електромагнітних шумів, застосовують кабель з подвійним екраном.

Вихідний сигнал також залежить і від деформації поверхні об'єкта контролю, який може генеруватися від передачі деформації на чутливий елемент. Вихід – потовщити основу акселерометра.

Чутливість до ядерного випромінювання і магнітного поля дуже низька.

Щодо можливого впливу вологості, то зазвичай акселерометри виконують з герметичним корпусом, роз'єм також герметизують каучуком. У більшості акселерометрів матеріали конструкції стійкі до корозійно-активних речовин. Основними компонентами матеріалів є сталь і титан.

І ще один впливовий фактор – це поперечні вібрації, що діють в напрямку, відмінному від напрямку головної осі. Їх слід враховувати при високому рівні поперечних вібрацій [19].

### **2.3 Аналіз причин виникнення похибок п'єзоелектричного акселерометра**

Розглянемо п'єзоелектричні акселерометри у даному контексті як вимірювальні перетворювачі. Тоді варто перелічити основні їх характеристики: чутливість, діапазон вимірювання, граничне значення перетворення, похибка вимірювання.

Чутливість оцінюють за її абсолютним і відносним значенням.

Абсолютне значення чутливості визначають за формулою:

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta X}, \quad (2.5)$$

а відносну чутливість – за формулою:

$$S_0 = \left( \frac{\Delta L}{\Delta X / X} \right), \quad (2.6)$$

де  $\Delta L$  – значення зміни сигналу, що є на виході;  $X$  – величина, що вимірюють;  $\Delta X$  – зміна величини, що вимірюють.

У сучасних моделей п'єзоелектричних акселерометрів чутливість за допустимих умов експлуатації не є проблемою, тому що застосування підсилювачів дозволяє приймати сигнали навіть низького рівня. Справа у правильному підборі маси акселерометрів, яка стає важливою для вимірювання на об'єктах з малою масою. Зазвичай маса акселерометра має складати не більше  $1/10$  від динамічної маси частини, що вібрує і на який має бути встановлений акселерометр. Частіше з положення виходять встановленням додаткової маси, яка змінюватиме рівні і частоти вібрації у контрольованій точці [19].

Особливу увагу треба звертати на випадки, коли необхідно вимірювати або дуже низький, або високий рівень прискорення, коли треба враховувати динамічний діапазон акселерометра. Щодо нижнього рівня, то він обумовлений не самим акселерометром, а електричними завадами у з'єднувальних кабелях і схемі підсилювача. А верхній визначається міцністю конструкції акселерометра [19].

Діапазон вимірювання має охоплювати той діапазон частот і віброприскорень, для якого передбачено застосування акселерометра на конкретному об'єкті контролю.

Під граничним значенням перетворення розуміють максимальне далі перетворювачем. Тоді динамічний діапазон вимірювання буде визначений максимальним і мінімальним значеннями величин на вході давача, вимірювання котрих здійснюється без спотворення.

Роботу п'єзоелектричних акселерометрів також описують динамічними характеристиками, які демонструють реакцію перетворювача при швидкій зміні величини, що вимірюють. До динамічних характеристик відносять амплітудо-частотні і фазові характеристики [22].

Амплітудо-частотна характеристика відображає зміну відносної амплітуди вхідного електричного сигналу акселерометра, що перебуває під дією механічного коливання з фіксованим прискоренням і з частотою, змінною у широкому діапазоні, а фазова характеристика відображає

залежність зсуву фаз між векторами вхідної і вихідної вимірюваних величин від частоти синусоїдальної зміни вхідної вимірюваної величини [22]. На рис. 2.3 показано приклад кривої амплітудо-частотної характеристики (залежність чутливості від частоти) п'єзоелектричного акселерометра.

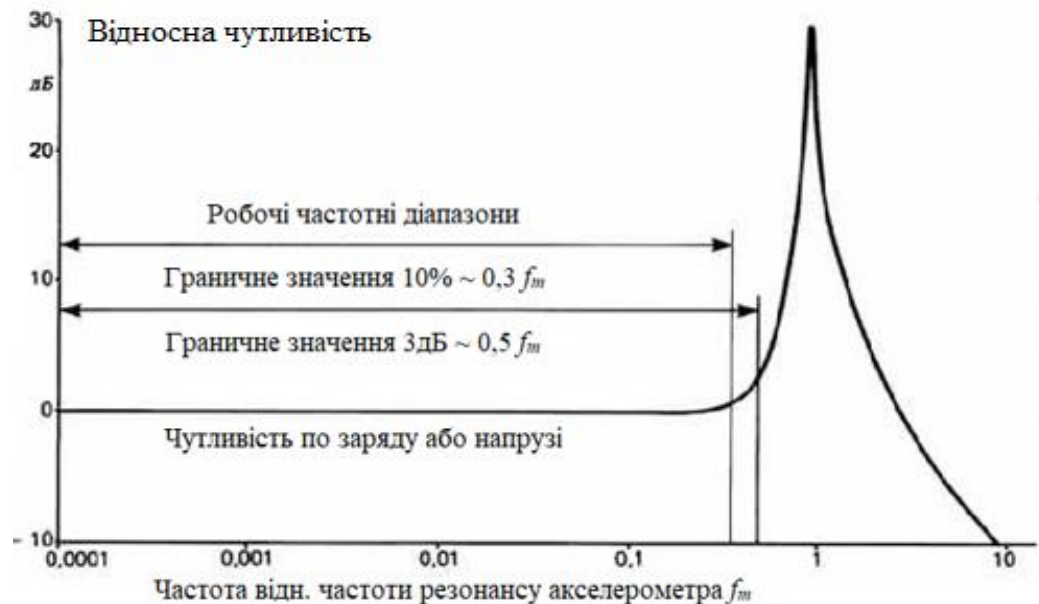


Рисунок 2.3 – Амплітудо-частотна характеристика п'єзоелектричного акселерометра

Більшість причин виникнення похибок п'єзоелектричного акселерометра обумовлені основними недоліками п'єзокерамічних матеріалів і залежить від температурних змін, що відбуваються в матеріалах, а саме [15, 21]:

- здатність матеріалу генерувати електричний заряд при незначних змінах температури довкілля;
- зміна зв'язку між тиском на п'єзопластину протягом вібровимірювання та електричним полем у матеріалі п'єзоелектрика, тобто можуть відбуватися деформації матеріалу під дією електричного поля при зміні температури;
- зміна діелектричної проникності матеріалу п'єзоелектрика;

– залишкові ефекти у матеріалі через попередні зміни температури, так званий температурний гістерезис.

Також причиною похибки може бути відхилення вимірювальної осі давача від заданого напрямку через неправильну установку п'єзоелектричного акселерометра.

Наступною причиною можуть бути різноманітні шуми у вимірювальній системі. Кожен шум потребує уваги, тому при проектуванні давачів слід вжити усіх заходів, щоб шуми звести до незначного мінімального значення або усунути його вплив [13].

У результаті проведеного аналізу роботи, недоліків і похибок п'єзоелектричного акселерометра, можна визначити основні напрямки вдосконалення п'єзоелектричних засобів вимірювання параметрів вібрації, які обумовлені значним впливом температури на властивості п'єзоматеріалів та малою вхідною потужністю п'єзоелектричних перетворювачів, через що виникає потреба у застосуванні підсилювача з великим вхідним опором.

## **3 УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЇ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ**

### **3.1 Основні напрямки розвитку засобів віброметрії**

Вібраційна діагностика за останні роки набула інтенсивного розвитку. Це пояснюється тим, що у робочому стані машин і механізмів процеси достатньо повно відображають реальний технічний стан більшості вузлів і деталей. Особливого розвитку цей напрямок діагностики набув у газовій, нафтопереробній промисловості, в енергетиці та транспорті [23].

Вібраційна діагностика здатна виявляти не тільки вузол, де може бути дефект, а і сам дефект. Причому дефект виявляють ще на стадії зародження,

що виключає подальші можливі аварійні зупинки машин і обладнання. А це, у свою чергу, знижує витрати на ремонтні роботи за фактичним станом, що у середньому може складати до третини витрат на ремонт і обслуговування [4].

З огляду на важливість проблеми, виникає потреба у розробці та впровадженні у виробництво ефективних засобів вібродіагностики. Ці засоби повинні вирізнятися здатністю обробляти значні обсяги вимірювальних даних завдяки застосуванню сучасних високопродуктивних обчислювальних пристроїв та відповідного програмного забезпечення.

Розроблювані пристрої діагностики мають відповідати наступним ключовим вимогам:

- режими роботи: мати можливість функціонувати як автономні аналізатори вібрації;
- зберігання даних: оснащуватися енергонезалежною внутрішньою пам'яттю;
- системна інтеграція: слугувати складовою частиною системи моніторингу, що має відповідну структуру, яка опрацьовує масиви даних з максимальною швидкістю при оптимальних об'ємах оперативної пам'яті з ефективним захистом від різного роду впливів, що можуть провокувати збій.

Для розшифрування даних, отриманих від п'єзоелектричного перетворювача в системі має передбачатися електронний блок обробки сигналу, ключовим елементом котрого є аналого-цифровий перетворювач (АЦП) встановлений на його вході. Впровадження АЦП на ранньому етапі обробки сигналу забезпечує низку важливих переваг: подальшу обробку сигналу можна здійснювати вже у цифровому форматі, що значно підвищує точність та гнучкість аналізу; система набуває значної стійкості до зовнішніх електромагнітних завад та шумів. Все це уможливорює виведення оцифрованої інформації через стандартний зовнішній інтерфейс (наприклад, USB, Ethernet або RS-485) для подальшої передачі та аналізу її на комп'ютері.

Створення засобів вібродіагностики із описаною структурою та належним програмним забезпеченням будуть здатні скласти заміну імпорнтним вартісним приладам.

На даному етапі розвитку давачів для засобів вимірювання параметрів вібрації вчені і конструктори проводять дослідження з покращення експлуатаційних характеристик та усунення різних виявлених недоліків.

Удосконалення засобів вимірювання вібрації спрямовано у першу чергу на зменшення похибок вимірювання параметрів вібрації, збільшення чутливості і розширення динамічного діапазону.

Дуже важливим є удосконалення і розроблення п'єзоелектричних давачів, здатних проводити вимірювання у реальному часі і в широкий смузі частот з належною роздільною здатністю. Дуже важливим є також вирішення задачі із зменшення маси давача завдяки застосуванню малогабаритної апаратури, яка містить у своєму складі мікропроцесорні блоки для обчислення, реєстрації і обробки і яка має бездротове керування вимірювальним процесом.

Наступний напрям удосконалення давачів – стійкість до завад. Навіть малі зовнішні завади мають значний вплив на точність.

У розділі 2 було детально розглянуто вплив зовнішніх факторів і умов проведення вимірювань. Підвищення надійності і стабільності показів у різних умовах експлуатації – задача, яка має вирішуватися для всіх засобів віброметрії, що дозволить розширювати можливості вібродіагностики і охоплювати нею об'єкти контролю, що перебувають навіть у суворих умовах.

### **3.2 Забезпечення максимальної ефективності вимірювального кола п'єзоелектричного давача**

З моменту розроблення і широкого застосування складних вимірювальних пристроїв у радіозв'язку, вимірювальних системах та

автоматиці постала задача розглядати шлях проходження сигналу від об'єкту до виходу, пройшовши усі перетворення і не втративши енергетичні властивості вхідного сигналу. Так з'явився термін, а скоріше поняття – визначення ефективності вимірювального кола, коли необхідно здійснити інформаційно-енергетичний аналіз кожного вузла ланцюга вимірювальних перетворювачів, який показує, наскільки добре коло виконує своє завдання перетворення фізичної величини в зручну для зчитування форму з мінімальними спотвореннями. Будь-який вимірювальний пристрій можна розглядати як канал, котрий сприймає вимірювану величину, перетворює її і передає, а в даний момент аналізу необхідно оцінити ефективність передавання і можливість підвищення ефективності п'єзоелектричного давача. Розглянемо умовну схему вимірювального пристрою, зображену на рис. 3.1.

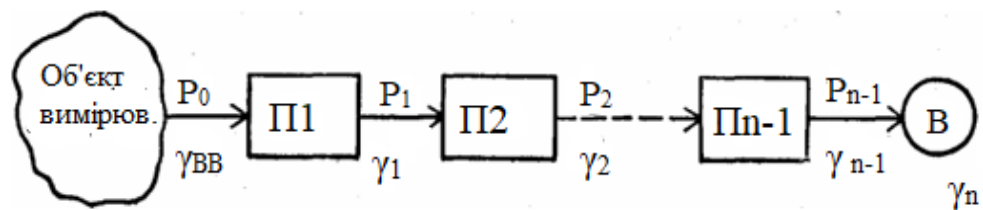


Рисунок 3.1 – Схема вимірювального пристрою

Передача вимірювальної інформації відбувається через передачу енергії потоками. У кожного потоку на певній ланці перетворення є своя потужність:  $P_0, P_1, P_2 \dots$ . Похибка на вході першого перетворювача, яку позначимо як  $\gamma_{ВВ}$ , визначається особливостями самої вимірюваної величини і залежить від потужності, яка передається засобу вимірювання від об'єкта

вимірювання –  $P_0$ . Далі за схемою маємо низку перетворювачів з їх похибками  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ , які в результаті будуть додаватися до похибки на виході  $\gamma_{BV}$ . Так по шляху вимірювального тракту похибка поступово зростає, тобто похибки окремих ланок додаються. Тому принцип побудови вимірювального пристрою полягає в тому, щоб забезпечити найменшу похибку кожної ланки, тобто кожного перетворювача у вимірювальному колі. Це не просто забезпечити, оскільки підвищення точності, чутливості і решта характеристик тягне за собою ускладнення самого перетворювача, збільшення його маси і зниження показників надійності. Єдиним рішенням цієї задачі лишається у знаходженні оптимальних співвідношень характеристик, що забезпечать належну якість пристрою в цілому. Проаналізуємо шляхи підвищення ефективності п'єзоелектричних перетворювачів.

З схеми рис. 3.1 зрозуміло, як шляхом перетворення механічної енергії, котра поступає на перетворювач від об'єкта вимірювання, одержується на виході п'єзоелектричного перетворювача електрична енергія, тобто електричний сигнал.

На прикладі проведення вимірювань прискорення вібрації проаналізуємо енергетичні перетворення у давачі п'єзоелектричного акселерометра. Рівняння прискорення вібрації має вигляд [12]

$$\ddot{x}(t) = \ddot{x}_m \sin \omega t \quad (3.1)$$

Ланцюг енергетичних перетворень зображено на рис. 3.2.

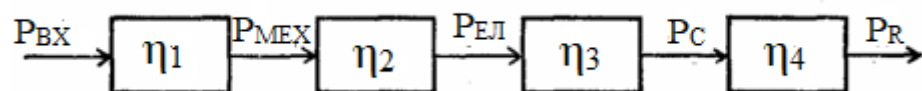


Рисунок 3.2 – Ланцюг енергетичних перетворень у давачі п'єзоелектричного акселерометра

На вхід діє коливальна потужність вібрації  $P_{вх}$ , яка приймається об'єктом вимірювання і витрачається на коливання цілого давача масою  $m_{\Sigma}$ . Знак  $\Sigma$  вказує на те, що коливальна потужність передає коливання і на корпус давача, і на основу, і з'єднувальний кабель та ін.  $P_{мех}$  — механічна коливальна потужність, яка витрачається на стиснення п'єзопластин, і є лише частиною від  $P_{вх}$ . Наступна потужність  $P_{ел}$  — це електрична коливальна потужність, яка генерується п'єзоелементом на його пластинах з ємністю  $C_0$ .  $P_C$  — коливальна потужність на сумарній ємності кола  $C_{\Sigma}$  (це реактивна потужність), яка виникає після приєднання до давача певного кола з ємністю  $C_{доб}$ .  $P_R$  — активна потужність, що виділяється давачем на активному вхідному опорі  $R$  вимірювального підсилювача. Це і є потужність корисного сигналу, яку одержує підсилювач від давача.

Колівальна потужність, що поступає на давач від об'єкту вимірювання, визначається енергією, котру затримує давач на одну четверту частину періоду коливань [12]:

$$P_{вх} = \frac{m_{\Sigma} \dot{X}_m^2}{2} \frac{4}{T} = \frac{m_{\Sigma} \ddot{X}_m^2}{2\pi^2 f}, \quad (3.2)$$

де  $m_{\Sigma}$  — маса цілого давача;  $\dot{X}_m$  — амплітуда швидкості;  $\ddot{X}_m$  — амплітуда прискорення;  $f$  — частота коливань. Вихідна потужність, що виділяється на навантаженні самого давача (на вхідному опорі  $R$  підсилювача), рівна [12]

$$P_R = \frac{U_m^2}{2R} = \frac{d^2 \omega^2 m_0^2 \ddot{X}_m^2 R}{2(1 + \omega^2 R^2 C_{\Sigma}^2)}, \quad (3.3)$$

або при  $1 \ll \omega^2 R^2 C_{\Sigma}^2$

$$P_R = \frac{d^2 m_0^2 \ddot{X}_m^2}{2RC_{\Sigma}^2}, \quad (3.4)$$

де  $m_0$  — активна маса, тобто маса елементів конструкції, що кріпиться на п'єзоелементі;  $C_{\Sigma} = C_0 + C_{доб}$  — сумарна ємність на виході;  $C_0$  — власна ємність п'єзоелемента;  $C_{доб}$  — ємність приєданого кабелю і вхідного кола підсилювача.

Тоді ефективність перетворення давача [12]

$$\eta = \frac{P_R}{P_{ex}} = \frac{d^2 m_0^2 \ddot{X}_m^2 2\pi^2 f}{2RC_\Sigma^2 m} \quad (3.5)$$

При такому аналізі необхідно також розглянути випадок з врахуванням похибки перетворення в області низьких частот  $\gamma_n = 1/(\omega^2 R^2 C_\Sigma^2)$  і в області високих частот  $\gamma_e = \omega^2/\omega_0^2$ . Якщо власна ємність п'єзоелемента  $C_0 = L/(\varepsilon S)$ , де  $L$  – довжина,  $S$  – площа п'єзоелемента,  $\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу п'єзоелемента, а чутливість давача акселерометра по напрузі  $S_U = dm_0/C_\Sigma$ , тоді одержимо вираз для ефективності перетворення [12]

$$\eta = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \gamma_e \sqrt{\gamma_n} \frac{\omega_0^2 S_U^2 C_\Sigma}{m_\Sigma} \quad (3.6)$$

А співвідношення, що є стабільним для певної частоти сигналу, який перетворюється, можна вважати показником ефективності п'єзоелектричних перетворювачів акселерометрів [12]

$$G = \frac{\eta}{\gamma_e \sqrt{\gamma_n}} = \frac{\pi \omega_0^2 S_U^2 C_\Sigma}{\sqrt{2} m_\Sigma}, \quad (3.7)$$

### **3.3 Визначення параметрів п'єзоелектричного перетворювача при підключенні його до вимірювального кола**

У попередніх розділах роботи було вже вказано про такий недолік п'єзоелектричних перетворювачів, як витікання заряду з п'єзопластини і, відповідно, потребу у застосуванні підсилювача, що має великий вхідний опір.

Спочатку розглянемо відому еквівалентну схему п'єзоелектричного перетворювача, що зображено на рис. 3.3 [13].

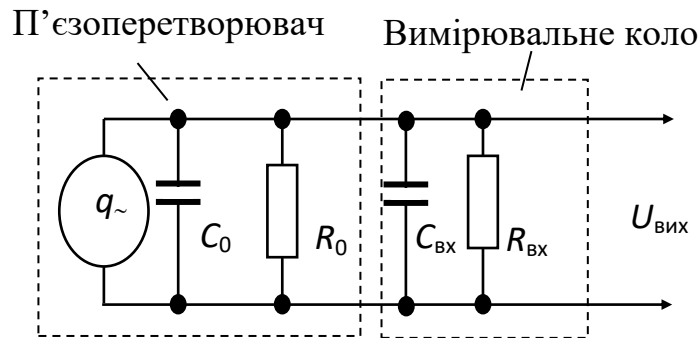


Рисунок 3.3 - Еквівалентна схема п'єзоперетворювача, підключеного до вимірювального кола

На цій схемі  $C_0$  – ємність перетворювача;  $C_{\text{вх}}$  – ємність загальна, тобто і з'єднувального кабелю і вхідна ємність наявного вимірювального кола;  $R_0$  – опір перетворювача, де враховано опір ізоляції лінії, який визначається як опір відносно землі;  $R_{\text{вх}}$  – вхідний опір загального вимірювального кола. Зазвичай, розглядаючи таку схему беруть до уваги тільки два елементи, це опір –  $R = R_0 R_{\text{вх}} / (R_0 + R_{\text{вх}})$  і загальну сумарну ємність –  $C = C_0 + C_{\text{вх}}$  [13].

Якщо п'єзоперетворювач буде підключений до вимірювального кола, то вихідна його напруга дорівнюватиме [13]

$$\dot{U}_{\text{вх}} = \dot{i} \left[ \frac{R/\omega C}{R + 1/(\omega C)} \right]. \quad (3.8)$$

Якщо коливальна сила, що діє на п'єзоелектричний перетворювач, має синусоїдальний характер у вигляді  $f(t) = F_m \sin \omega t$ , то значення струму буде рівне

$$I = dQ/dt = d(d_{33} F_m \sin \omega t) / dt, \quad (3.9)$$

де  $d_{33}$  – п'єзомодуль, який показує коефіцієнт перетворення діючої сили  $F$  в електричний заряд  $Q$  на п'єзопластині перетворювача. Цей коефіцієнт залежить від матеріалу п'єзоперетворювача і вимірюється у Кл/Н. Так для кварцу він рівний  $2,3 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н, а у титанатів він змінюється від  $45 \cdot 10^{-12}$  до  $51 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н, а для цирконатів – від  $75 \cdot 10^{-12}$  до  $160 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н [24].

Отже, формула (3.8) для діючих значень сили і струму набудуватиме вигляду

$$\dot{U}_{вих} = d_{33} F \frac{j\omega R}{1 + j\omega RC}. \quad (3.10)$$

Проаналізуємо формулу (3.10). Оскільки амплітуда напруги і значення зсуву фаз між напругою і коливальною силою, яку вимірюємо, залежать від частоти, тоді можна одержати наступний вираз для визначення напруги

$$\dot{U}_{вих} = \frac{d_{33} F \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_{вх} + C_0)^2}}; \quad (3.11)$$

і вираз для визначення фази

$$\Psi = \frac{\pi}{2} - \arctg(\omega(C_{вх} + C_0)R). \quad (3.12)$$

З виразів (3.11) і (3.12) слідує, що напруга на вході підсилювача не буде залежати від частоти тільки при високих частотах  $\omega > 1/(\omega(C_{вх} + C_0))$  і дорівнюватиме

$$\dot{U}_{вих} = \frac{d_{33} F}{C_{вх} + C_0}. \quad (3.13)$$

Вираз (3.13) чітко демонструє залежність вихідної напруги перетворювача від ємності вхідного кола. При наявності інформації про чутливість перетворювача необхідно вказувати ще значення ємності, що відповідає цій чутливості. Іноді у паспорті на перетворювач вказано чутливість за кількістю електрики  $Q$  від сили  $F$  ( $Q / F$ ) і власна ємність перетворювача  $C_0$ , а іноді – напруга холостого ходу  $U_{вих} = d_{33} F / C_0$  і також ємність перетворювача. Це дозволяє вийти на оптимальний режим роботи п'єзоелектричного перетворювача.

### 3.4 Розширення частотного діапазону п'єзоелектричного акселерометра

Чутливість п'єзоелектричного акселерометра по напрузі і по заряду не є залежною від частоти як в області низьких так і середніх частот в межах робочого діапазону акселерометра, якщо п'єзоелемент виготовлено з кераміки, яка є фероелектричною, та кварцових кристалів. При збільшенні частоти будемо спостерігати, що чутливість по заряду та ємність акселерометрів з ідентичним матеріалом п'єзоелемента буде падати. Частково це нівелюється в зоні власного резонансу акселерометрів. Отже, чутливість по заряду акселерометрів не буде змінюватися більше ніж на  $\pm 5\%$  і залишиться в таких же межах на всіх робочих частотних діапазонах, як це видно з рис. 3.4 [20].

Чутливість по напрузі може змінюватися від ємності з'єднувального кабелю, через що необхідно акселерометр застосовувати з тим кабелем, що входить до комплекту поставки засобу.

Відносна чутливість по заряду і напрузі, %

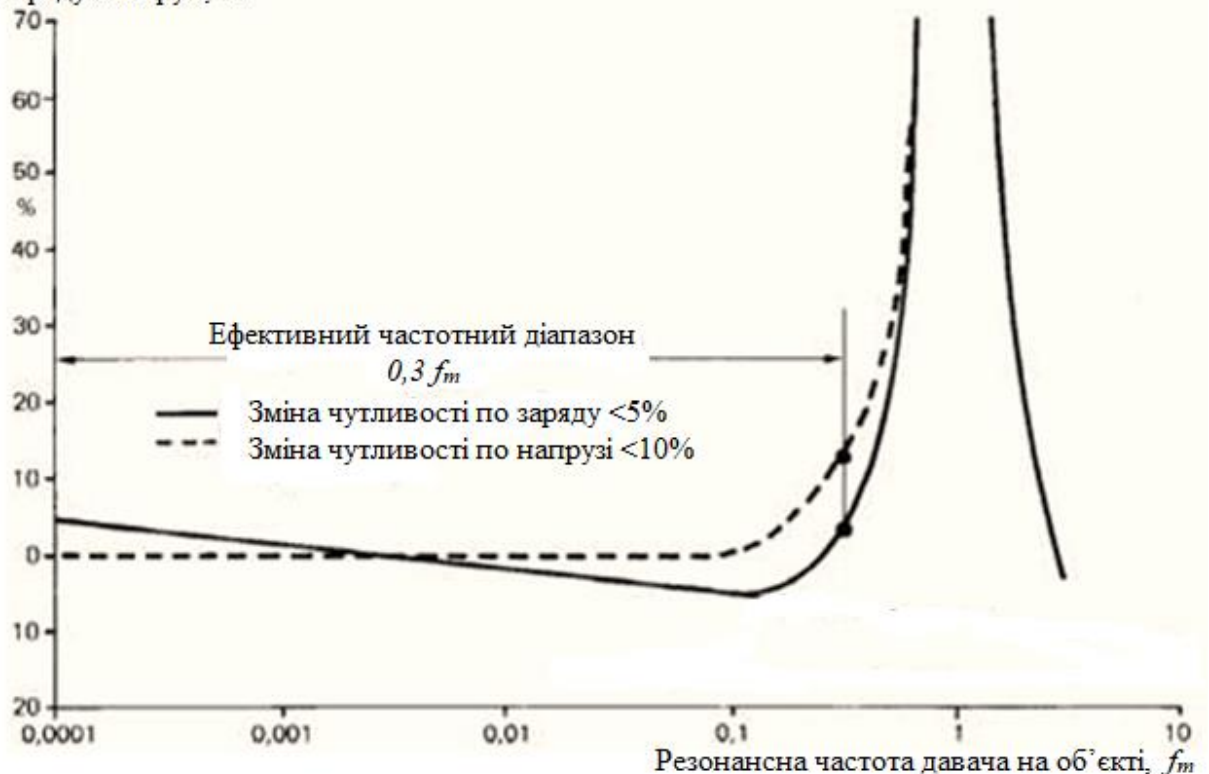


Рисунок 3.4 – Зміна чутливості п'єзоелектричного акселерометра від частоти по заряду і по напрузі

Щоб збільшити частотний діапазон вимірювання в бік низьких частот, необхідно збільшувати постійну часу кола  $\tau = R (C_{ex} + C_0)$ , а значення опору і ємностей вибирають з довідникових даних в функції частоти для різних поєднань  $R$  і  $C = C_0 + C_{ex}$ . [20]. Як видно з формули (3.13) збільшити ємність  $C_{ex}$  можна завдяки конденсаторам, що вмикають у коло паралельно перетворювачу, вихідна напруга зменшуватиметься.

Збільшення опору  $R$  призводить до розширення частотного діапазону без втрати чутливості, однак збільшувати вхідний опір підсилювача  $R_{ex}$  можна до  $10^8$ - $10^9$  Ом.

Назвемо основні похибки п'єзоелектричних перетворювачів: похибка від зміни температури, похибка від зміни параметрів вимірювального кола, обумовлена зміною ємності  $C_{ex}$ , похибка від неправильної установки перетворювача і пластин в ньому, похибка внаслідок дії сил перпендикулярно вимірювальної осі перетворювача, частотна похибка.

Частотна похибка у низькочастотному діапазоні обчислюється за формулою [20]

$$\gamma_H = 1 - \omega \frac{R(C_0 + C_{BX})}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_0 + C_{BX})^2}} \approx \frac{1}{2\omega^2 R^2 (C_0 + C_{BX})^2} \quad (3.14)$$

Верхня межа допустимого частотного діапазону п'єзоелектричного перетворювача обумовлена в більшій степені його механічними характеристиками. При частоті власних коливань біля 100кГц п'єзоелектричний перетворювач здатний здійснювати вимірювання параметрів механічних коливань з частотою до 10 кГц.

При умові, що вдається розширити частотний діапазон, необхідно на наступному етапі роботи запропонувати схему включення п'єзоелектричного перетворювача з великим вхідним опором.

Аналізуючи еквівалентну схему перетворювача рис. 3.3, приходимо до висновку, що для схеми підключення перетворювача необхідно застосувати підсилювач із збільшеним вхідний опором за рахунок використання електронної схеми типу повторювача напруги і застосувати кабель з подвійним екраном, рис. 3.5.

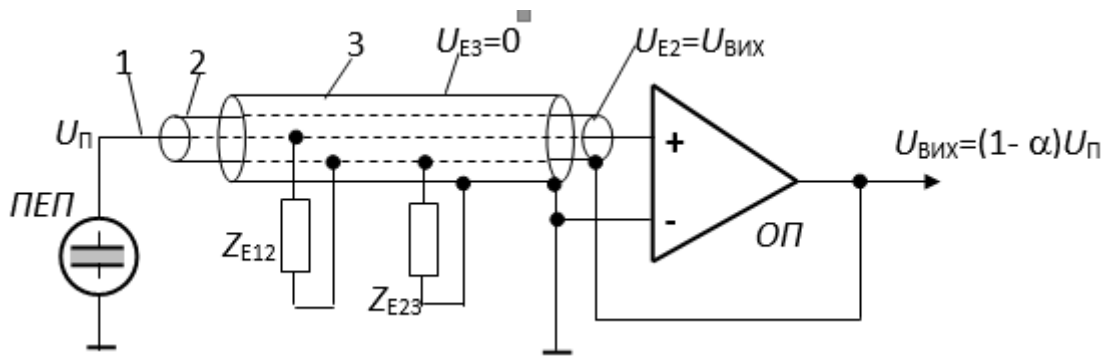


Рисунок 3.5 – Схема підключення п'єзоелектричного перетворювача до підсилювача за допомогою спеціального кабелю з подвійним екраном

П'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) під'єднують до електронного підсилювача кабелем, який має три жили: 1 – центральна жила, якою передається вимірювальний сигнал, 2, 3 – провідники, що екранують і виконують роль захисту жили 1. Внутрішній екран 2 підключено до виходу повторювача напруги, який реалізовано на базі операційного підсилювача (ОП), підключеного з одиничним зворотним зв'язком. При такому включенні екран 2 має потенціал  $U_{\text{вих}}$ , приблизно рівний потенціалу  $U_{\text{П}}$  вихідного сигналу перетворювача (ПЕП). Позначимо власний опір між центральною жилою 1 і екраном 2 як  $Z_{E12}$ , тоді струм, що протікає цим опором є рівним [20]

$$I = \frac{U_{\text{П}} - U_{\text{вих}}}{Z_{E12}} = \frac{U_{\text{П}} - (1 - \alpha)U_{\text{П}}}{Z_{E12}} = \frac{\alpha U_{\text{П}}}{Z_{E12}} \quad (3.15)$$

де  $U_{\text{вих}} = (1 - \alpha)U_{\text{П}}$  – вихідна напруга повторювача напруги,  $(\alpha - 1) \ll 1$  – коефіцієнт, що показує ступінь відхилення вихідної напруги повторювача від вхідної і дорівнює відносній похибці відтворення напруги повторювачем.

Еквівалентний опір  $Z_{\text{екв}12}$  між центральною жилою кабелю і внутрішнім екраном 2 визначимо за законом Ома [20]:

$$Z_{\text{екв}12} = \frac{U_{\Pi}}{I} = \frac{U_{\Pi} Z_{\text{Е}12}}{\alpha U_{\Pi}} = \frac{1}{\alpha} Z_{\text{Е}12}. \quad (3.16)$$

З останнього виразу випливає, що застосування кабелю з подвійним екраном, включеного відповідно до схеми рис.3.5 еквівалентно збільшенню власного опору кабелю в  $1/\alpha$  разів. Це справедливо як до активного опору кабелю, так і до його ємнісного опору між центральною жилою і внутрішнім екраном. Так, якщо повторювач напруги відтворює сигнал з похибкою близько 1%, то схема, зображена на рис.3.5, дозволить збільшити еквівалентний опір кабелю приблизно в 100 разів.

Опір  $Z_{\text{Е}23}$  між внутрішнім і зовнішнім екранами підключають паралельно потужному виходу повторювача напруги і тоді опір не впливатиме на метрологічні показники розглянутої схеми.

### **3.5 Застосування методу корекції амплітудо-частотної характеристики для розширення частотного діапазону п'єзоелектричних віброметрів**

Наступною задачею удосконалення віброперетворювачів з метою одержання оптимальних параметрів та їх ефективного впровадження є зміни вихідних параметрів віброметра, що досягається наступними шляхами: збільшення власної частоти вимірювального приладу з метою розширення його частотного діапазону, зменшення тієї ж частоти – розширення частотного діапазону засобів й зменшення ступеня заспокоєння – вибір оптимальної частотної характеристики. Для покращення амплітудо- і фазочастотних характеристик необхідно забезпечити їх корекцію.

Є два методи корекції. У першому методі реалізується застосування у структурі засобу вимірювання відповідної схеми корекції, яка являє собою частотозалежну ланку у вигляді чотириполюсника.

Для забезпечення корекції п'єзоелектричних акселерометрів, що мають електричний вихід, чотириполюсник вмикають між перетворювачем і підсилювачем як корегувальну ланку. Вона має вирівнювати частотну характеристику приладу в цілому в необхідному діапазоні частот. Якщо ми прагнемо ідеальної частотної характеристики віброперетворювача, то необхідно добиватися того, щоб у визначеному діапазоні частот частотна характеристика коригувальної ланки була зворотною функцією вихідній функції частотної характеристики приладу в цілому. Тому амплітудо-частотна характеристика (АЧХ) вже скорегованої схеми буде у визначеному діапазоні частот постійною.

Реалізація корекції за розглянутим методом проілюстрована на рис. 3.6.

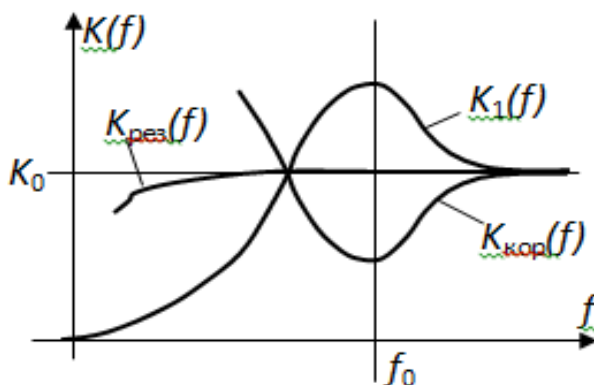


Рисунок 3.6 – Корекція АЧХ вібровимірювача введенням послідовної коригувальної частотозалежної ланки

На даному рисунку показано вихідну частотну характеристику приладу – крива  $K_1(f)$ , характеристику корегувальної ланки – крива  $K_{кор}(f)$  і характеристику приладу з врахуванням коригувальної ланки – результуюча крива  $K_{рез}(f)$ , яку отримано як добуток перших двох. Даний метод передбачає послідовне включення коригувальної ланки, тому цей метод називають послідовним.

Другий метод корекції передбачає додавання до сигналу віброперетворювача частини того ж сигналу, який був перетворений коригувальною ланкою так, щоб вихідна поправка дорівнювала за величиною і була протилежна за знаком частотної похибки приладу.

Отже, на виході буде результуючий сигнал з необхідною частотною характеристикою. Сигнал після такої корекції показано на рис. 3.7, де крива  $K_1(f)$  – АЧХ приладу до корекції, крива  $K_{\text{кор}}(f)$  – АЧХ корегувальної ланки, крива  $K_{\text{рез}}(f)$  – результуючий сумарний сигнал. Метод за рис. 3.7 називають паралельною корекцією, тому що передбачено паралельне ввімкнення ланок схеми, або корекцією на основі моделювання похибки.

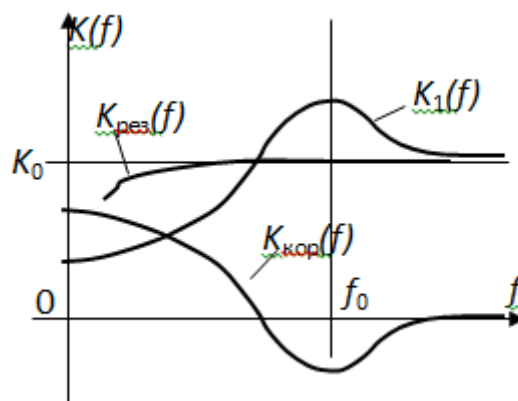


Рисунок 3.7 – Корекція АЧХ вібровимірювача введенням паралельної коригувальної частотнозалежної ланки

Порівняння двох методів корекції показує, що конструктивно перший метод простіше, бо проста сама схема корегувального фільтра й існує тільки один тракт проходження сигналу, але другий метод дозволяє скорегувати резонансні піки давача пасивним RC-фільтром і можна також окремо виділити помилковий сигнал, що є перевагою даного методу.

Віддати перевагу одному з методів дуже важко, тому розглянемо перший метод – метод послідовної корекції. Цей метод передбачає прості

зміни АЧХ і достатньо ввести в схему приладу послідовну частотнозалежну ланку.

Синтез частотнозалежної ланки здійснюють різними методами. Так, наприклад, алгебраїчний метод представляє коефіцієнт передачі приладу у вигляді дробно-лінійної функції [20]

$$K(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0} \quad (3.17)$$

Синтез коригувальної ланки полягає у визначенні значень коефіцієнтів  $a_i$ ,  $b_j$  поліномів чисельника і знаменника виразу (3.17).

У теорії автоматичного керування застосовують метод знаходження параметрів коригувальних ланок, заснований на використанні логарифмічних амплітудних і фазових характеристик (метод ЛАХ і ЛФХ) [20, 22]. Розглянемо реалізацію даного методу на прикладі приладу ВВМ-201 і з аналізу еквівалентної електричної схеми включення п'єзоелектричного віброперетворювача в вимірювальну систему. Амплітудно-частотна характеристика вимірювальної системи в цілому може бути представлена у вигляді реально - диференціальної ланки (формула (3.10)). На рис. 3.8 показано результати визначення параметрів коригувальної ланки за допомогою логарифмічних частотних характеристик. Так по осі частот  $\omega$  і по осі коефіцієнта перетворення  $K(\omega)/K_0$  вихідна (до корекції) амплітудно-частотна характеристика  $K_{вих}(\omega)$  в апроксимованому вигляді представляється двома відрізками з логарифмічним масштабом: горизонтальним відрізком  $ab$  на рівні  $K(\omega)/K_0=1$  і похилим відрізком  $ac$ . Цей відрізок показує спад вихідної (до корекції) АЧХ в області низьких частот.

Що стосується реальних перетворень на прикладі приладу – віброметр Landtek VM-6360, то за вузлову точку беремо нижню робочу частоту, яка дорівнює  $f_j=2$  Гц або  $\omega_1 = 2\pi$ ;  $f_j=2 \cdot \pi \cdot 2c^{-1}=12,6c^{-1}$ .

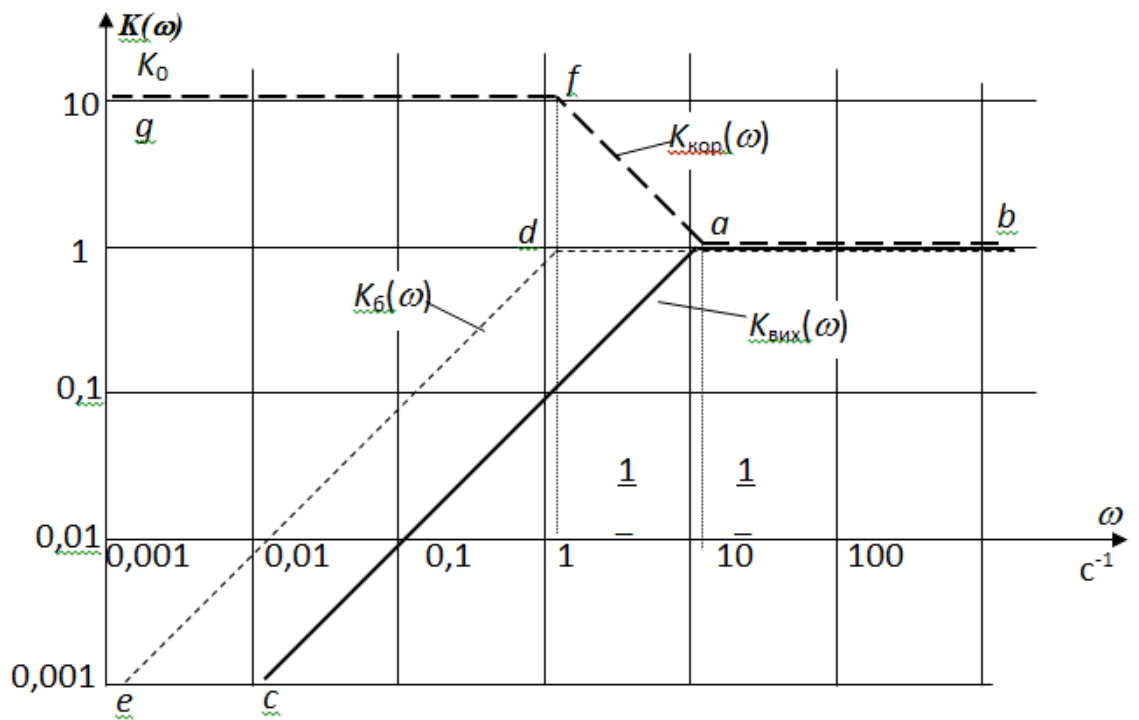


Рисунок 3.8 – Логарифмічна частотна характеристика для визначення параметрів коригувальної ланки

Якщо визначити мету удосконалення віброперетворювача підключеного до схеми з підсилювачем у вигляді розширення області низьких частот на порядок, то бажана АЧХ  $K_b(\omega)$  приладу в цілому буде мати вигляд пунктирних ліній  $db$  і  $de$ . А от АЧХ  $K_{кор}(\omega)$  коригувальної ланки при послідовній корекції буде представлена як різниця характеристик бажаної і вихідної

$$K_{кор}(\omega) = K_b(\omega) - K_{вих}(\omega). \quad (3.18)$$

Розглянемо результат корекції за одержаним зображенням АЧХ рис. 3.8. АЧХ коригувальної ланки  $K_{кор}(\omega)$  має три характерні ділянки: перша ділянка – відрізок  $ab$  в області частот  $\omega > \omega_1$ , де коефіцієнт коригувальної ланки рівний одиниці, з чого робимо висновок, що на цій ділянці частот коригувальна ланка не чинить своєї коригувальної дії, а коефіцієнт перетворення буде дорівнювати  $K_0$ . Відрізок  $af$  відповідає ділянці АЧХ, де коефіцієнт передачі зростає і зростає лінійно при зменшенні частоти, а на певній частоті  $\omega = \omega_2$  він стає рівний 10, що свідчить про компенсацію

загасання вихідного коефіцієнта передачі  $K_{вих}(\omega)$  вібровимірювача. Відрізок  $fg$  – це третя ділянка з постійним коефіцієнтом передачі коригувальної ланки, який набуває постійного значення – 10. Рівняння частотної характеристики як передавальної характеристики у символічній формі набуває вигляду [20]:

$$K(p) = K_1 \frac{1 + pT_2}{1 + pT_1}, \quad (3.19)$$

де  $K_1 = 10$  - коефіцієнт передачі коригувальної ділянки в області нижніх частот;  $T_1 = 1/\omega_1$  - постійна часу, що відповідає частоті  $\omega_1$ ;  $T_2 = 1/\omega_2$  - постійна часу, що відповідає частоті  $\omega_2$ .

Коригувальну ланку, застосовуючи викладені вище міркування, зручно реалізувати на базі операційного підсилювача, охопленого частотно-залежним зворотним зв'язком, як це показано на рис. 3.9.

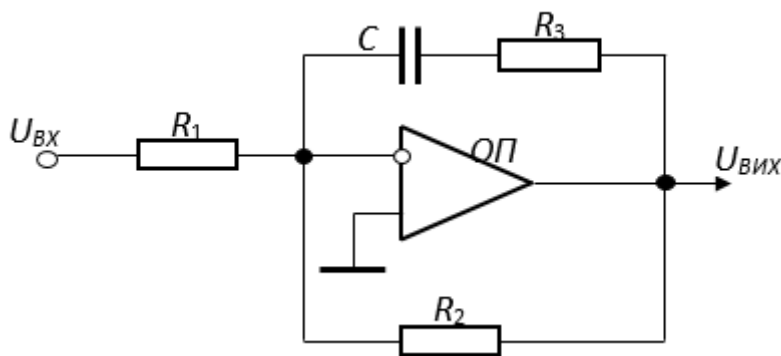


Рисунок 3.9 – Схема коригувальної ланки

Для такої ланки коефіцієнт передачі можна записати у символічній формі наступним чином

$$K_{кор}(p) = \frac{Z_{ос}(p)}{R_1}, \quad (3.20)$$

де  $Z_{ос}(p)$  - повний опір від'ємного зв'язку ОП даної схеми. Від'ємний зв'язок реалізовано паралельним з'єднанням двох гілок: резистора  $R_2$  і гілки

$$Z_{CR_3}(p) = R_3 + \frac{1}{pC} = \frac{1 + pCR_3}{pC}. \quad (3.21)$$

Отже,

$$Z_{oc}(p) = R_2 \frac{1 + pCR_3}{1 + pC(R_2 + R_3)}. \quad (3.22)$$

Підставляючи вираз (3.22) у вираз (3.20), можна одержати вираз для визначення коефіцієнта передачі схеми рис.3.9:

$$K_{кор}(p) = \frac{R_2}{R_1} \frac{1 + pCR_3}{1 + pC(R_2 + R_3)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1 + pT_2}{1 + pT_1}, \quad (3.23)$$

де

$$T_1 = C(R_2 + R_3); \quad T_2 = CR_3 \quad (3.24)$$

– постійні часу з формули (3.19).

Залишилося визначити параметри елементів коригувальної ланки ( $R_1$  ...  $R_3$  і  $C$ ). Можна задатися значеннями  $C = 1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$  і  $R_1 = 100 \text{ кОм} = 10^5 \text{ Ом}$ . Тоді значення опору  $R_3$  можна визначити з формули [25]

$$R_3 = \frac{T_2}{C} = \frac{0,0796 \text{ с}}{10^{-6} \text{ Ф}} = 79,6 \text{ кОм}. \quad (3.25)$$

А значення опору  $R_2$  знаходимо з виразу (3.24) для постійної часу  $T_1$ :

$$R_2 = \frac{T_1}{C} - R_3 = \frac{0,796 \text{ с}}{10^{-6} \text{ Ф}} - 79,6 \cdot 10^3 \approx 716 \text{ кОм}. \quad (3.26)$$

Отже, на даному етапі можна вважати, що розглянуто питання, які ставилися у завданні на магістерську роботу з вирішення основних питань щодо удосконалення засобів вимірювань параметрів вібрації.

## ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі було проаналізовано основні причини виникнення та параметри вібрації, які підлягають вимірюванню або моніторингу протягом експлуатації механізмів і машин з метою встановлення реального технічного стану.

Вібродіагностика машин і механізмів здійснюється віброакустичним методом контролю, в основі котрого покладений аналізу шумових характеристик і характеристик вібрацій. У випадку проведення функціонального методу вібродіагностики досліджуваний об'єкт має перебувати у робочому стані, тобто працювати за призначенням у різних режимах роботи з можливим порівнянням віброакустичних сигналів у таких режимах. Для функціонального методу вібродіагностики застосовують наступні методи, які було розглянуто у даній роботі: метод спектрального аналізу; метод ударних імпульсів; Вайвлет-аналіз; метод аналізу загального рівня вібрації і метод прямого спектра. Проведений аналіз методів показав, що для вібраційної діагностики і контролю найоптимальнішим є метод спектрального аналізу.

Аналіз перетворювачів у складі приладів показав, що дуже хороші показники продемонстрували п'єзоелектричні перетворювачі, оскільки не вимагають додаткового джерела живлення, мають чітко виражений характер перетворення, мають високу чутливість, великий коефіцієнт корисної дії, характеризуються високою стабільністю, легко технічно реалізуються в умовах вібродавачів, також мають малі габарити і масу, придатні до експлуатації у широкому діапазоні температур, що є неодмінно визначним для застосування у вібровимірювальних приладах. Нарешті, доводиться враховувати економічні фактори, пов'язані з вартістю отриманого перетворювача і терміном його служби. За сукупністю цих якостей найкращими для віброметрії виявилися п'єзоелектричні перетворювачі та п'єзоелектричні акселерометри з вихідним сигналом по напрузі.

Дуже важливим є удосконалення і розроблення п'єзоелектричних давачів, здатних проводити вимірювання у реальному часі і в широкий смузі частот з належною роздільною здатністю. Дуже важливим є також вирішення задачі із зменшення маси давача завдяки застосування малогабаритної апаратури, яка містить у своєму складі мікропроцесорні блоки для обчислення, реєстрації і обробки та мали бездротове керування вимірювальним процесом. Наступний напрям удосконалення давачів – стійкість до завад. Навіть малі зовнішні завади мають значний вплив на точність.

На першому етапі робіт з удосконалення п'єзоелектричного перетворювача та п'єзоелектричних акселерометрів було проаналізовано шлях проходження сигналу від коливальної сили по тракту п'єзоелектричного перетворювача та визначено підходи з оцінювання ефективності п'єзоелектричних перетворювачів акселерометрів.

Н наступному етапі було визначено параметри п'єзоелектричного перетворювача при підключенні його до вимірювального кола на основі аналізу його еквівалентної схеми, в результаті чого встановлено залежність вихідної напруги перетворювача від ємності вхідного кола.

Аналізуючи еквівалентну схему перетворювача прийшли висновку, що для схеми підключення перетворювача необхідно застосувати підсилювач із збільшеним вхідний опором за рахунок використання електронної схеми типу повторювача напруги і застосувати кабель з подвійним екраном.

Наступною задачею удосконалення віброперетворювачів з метою одержання оптимальних параметрів та їх ефективного впровадження є зміни вихідних параметрів віброметра, що досягається наступними шляхами: збільшення власної частоти вимірювального приладу з метою розширення його частотного діапазону, зменшення тієї ж частоти – розширення частотного діапазону засобів й зменшення ступеня заспокоєння – вибір оптимальної частотної характеристики. Для покращення амплітудо- і фазочастотних характеристик необхідно забезпечити їх корекцію.

На завершальному етапі роботи було реалізовано метод знаходження параметрів коригувальних ланок, заснований на використанні логарифмічних амплітудних і фазових характеристик, дозволило розширити область низьких частот на порядок на прикладі приладу ВВМ-201 та розроблено схему коригувальної ланки.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. ДСТУ 2300-93. Вібрація. Терміни та визначення URL:  
[https://dnaop.com/html/61707/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3\\_2300-93](https://dnaop.com/html/61707/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_2300-93)
2. <https://www.souz-pribor.ru/articles/izmerenie-parametrov-vibratsii/>
3. Параметри вібраційного процесу  
<https://eam.su/lekcija-11-parametry-i-xarakteristiki-mexanicheskix-kolebanij.html>
4. Передерко А.Л. Наукові основи розробки методів та засобів вимірювання вібрації і вібровипробувань в технічних системах/А.Л. Передерко, В.П. Квасніков// Монографія. ТОВ «НВП Інтерсервіс», Київ-2019..
5. Sydorov V.A. Ynformatsyonnye osnovy vybrometryu. Vestnyk SevNTU. – Sevastopol: Yzd-vo SevNTU, 2011. – Выр. 117: Mashynopryborostroenye y transport. – S.157-165.
6. Kostiukov V.N. Osnovy vybroakustycheskoї dyahnostyky y monytorynha mashyn: ucheb. posobyе / V. N. Kostiukov, A. P. Naumenko. – Om. : OmNTU, 2011. – 360 s. : yл.
7. Kostiukov, V.N. Monytorynh sostoianyia oborudovanyia v realnom vremeny [Tekst] /, V.N. Kostiukov, Al. V. Kostiukov // Kontrol. Dyahnostyka. – 2020. – № 3 – S. 43–50
8. Кравченко В.М. Техническое обслуживание и диагностика промышленного оборудования. – Донецк: ООО Юго-Восток, Лтд, 2004. – 504 с.
9. <https://simvolt.ua/ru/vibrometry-ua/>
10. ДСТУ ISO 2954:2005 Механічна вібрація машин з вертикально-поступним і обертовим рухом. Вимоги до засобів вимірювання жорсткості вібрації (ISO 2954:1975, IDT)

11. ДСТУ ГОСТ ІСО 10816-1:2007 Вібрація. Контроль стану машин за наслідками вимірювань вібрації на частинах, що не обертаються. Частина 1. Загальні вимоги (ГОСТ ІСО 10816-1-97, IDT; ISO 10816-1:1995, MOD)

12. Гуров А. П. Вібродіагностика: навчальний посібник / А. П. Гуров, Д. Ю. Шарейко. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. - 116 с.

13. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підручник. – Львів: Видавн. Державного університету «Львівська політехніка», 2000. – 360с.: іл..

14. Кузів А.Р. Кононенко М.А. Огляд перетворювачів для забезпечення вимірювання параметрів вібрації. Інформаційні технології в освіті, техніці та промисл: матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф., Івано-Франківськ, 09 жовтня 2025 р. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2025. – 138-139 с.

15. Передерко А. Л. Теоретичні основи розвитку вимірювання вібрації і вібровипробувань в технічних системах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.01 / А. Л. Передерко; Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку. – Одеса, 2021. – 41 с. - укр.

16. <https://anwit.kiev.ua/ru/stati/tekhnicheskie-stati/193-measuring-vibration>

17. <https://guidenav.com/uk/accelerometer/>

18. Безвесільна О. М. Статична похибка п'єзоелектричного акселерометра [Текст] / О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук// Вісник інженерної академії України. — 2011. — № 2. — С. 150—154.

19. Yzmerytelnoe u uspytatelnoe oborudovanye v Ukrayne

<https://anwit.kiev.ua/ru/stati/tekhnicheskie-stati/193-measuring-vibration>

21. Perederko A.L. Correction of temperature influence on piezoelectric accelerometers/ A.L.Perederko// The scientific heritage (Budapest, Hungary). – 2019 – No. 34. – Pg. 55-56.

23. Кузів А., Кононенко М. Напрямки створення сучасних засобів вимірювання вібрації. Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей VII Міжнародної науково-

практичної конференції, 20–21 листопада 2025 року. Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2025. – 152 с.

25. Symmetron Group: Elektronnye komponenty [Electronic componens. Piezoceramics]. Available at: <http://www.symmetron.ru/suppliers/apc/index.shtml>

26. Передерко А.Л. Корекція температурного впливу на п'єзоелектричний акселерометр/ А.Л.Передерко// Вісник Черкаського технологічного університету. – 2019. -Вип. 1. – С.83–86.