

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до циклу лабораторних робіт

з дисципліни

**"Методи та засоби дослідження РЕЗ",
частина 1**

для студентів для студентів усіх форм навчання
напряму підготовки 0910
"Електронні апарати"

2010

Методичні вказівки до циклу лабораторних робіт з дисципліни "Методи та засоби дослідження РЕЗ", частина 1 для студентів усіх форм навчання напряму підготовки 0910 "Електронні апарати" / Уклад.: Крищук В.М., Поспеева І.Є. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. – 22 с.

Укладачі : Крищук Володимир Миколайович, канд. техн. наук, доцент
Поспеева Ірина Євгенівна, асистент,

Рецензент: Перегрін Геннадій Ростиславович, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск:
Крищук Володимир Миколайович, канд. техн. наук, доцент

Затверджено
на засіданні кафедри КВР
протокол № 5 від 21.04.2010 р.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПІВ ДІЇ ТА КОНСТРУКЦІЙ ВІБРОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета роботи: практичне знайомство з видами, принципами дії та конструкціями віброперетворювачів, що застосовуються у апаратурі для проведення механічних випробувань.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Класифікація віброперетворювачів

Для виміру параметрів вібрацій використовуються вимірювальні пристрої і вимірювальні установки, які називаються віброметрами. У залежності від характеру вібрацій розрізняють лінійні і кутові віброметри, призначені для виміру параметрів лінійної і кутової вібрацій. Віброметри можуть використовуватись для вимірів одного чи декількох параметрів. Розрізняють лінійні віброметри, призначені для виміру переміщення, швидкості (вібровелосиметр) і прискорення (віброакселерометр).

Джерелом сигналу вимірювальної інформації про значення вимірюваних параметрів вібрації є вібровимірювальний перетворювач (віброперетворювач). Сучасні віброперетворювачі в основному, побудовані на принципах електричних вимірів неелектричних величин (сигналів), коли механічні коливання перетворюються в електричні. Вібровимірювальні перетворювачі класифікуються за рядом незалежних ознак.

За призначенням вимірювальні перетворювачі можуть використовуватись для виміру різних параметрів вібрації. У залежності від вимірюваного параметра вібрації, віброперетворювачі можуть називати: **акселерометрами** – для виміру прискорення і **велосиметрами** – для виміру швидкості.

За зв'язком (взаємодією) сприймаючої (чуттєвої) частини з об'єктом виміру розрізняють **контактні і безконтактні** перетворювачі. Застосування контактних чи безконтактних перетворювачів залежить від розмірів і маси віброуючих виробів. Якщо розміри і маси виробів порівнянні або менше розмірів і мас

контактних перетворювачів, то необхідно застосовувати безконтактні вимірювальні перетворювачі.

За принципом виміру щодо системи відліку вимірювальні перетворювачі можуть бути засновані: на визначенні координат окремих точок виробу щодо нерухомої системи відліку, з якої ведуться спостереження – **кінематичний принцип**; або на створенні штучної нерухомої системи відліку у виді інерційного елемента, що з'єднується з віброючим виробом через пружний підвіс (м'яку пружину) – **динамічний принцип**. При здійсненні динамічного принципу виміри параметрів вібрації виробу, виробленого в умовах сталого процесу, щодо інерційного елемента будуть абсолютним. Перетворювачі, побудовані за динамічним принципом часто називають **інерційними**.

За принципом перетворення механічних коливань в інші види коливань розрізняють **активні і пасивні** вимірювальні перетворювачі. В активних вимірювальних перетворювачах вихідний сигнал утворюється за рахунок вхідної механічної енергії і постійного джерела енергії. До активних перетворювачів відносяться фотоелектричні, гамма-квантові, ємнісні й ін. У пасивних вимірювальних перетворювачах вихідний сигнал утворюється тільки за рахунок вхідної механічної енергії. До пасивних перетворювачів відносяться п'єзоелектричні, електретні й ін.

За родом вимірюваних компонентів вібрації розрізняють перетворювачі для **виміру лінійних компонентів коливань** (однокомпонентні, двокомпонентні, трикомпонентні), а також **для виміру кутових компонентів**.

За напрямком прикладення сили при механічних впливах розрізняють вимірювальні перетворювачі **спрямованої і ненаправленої дії**. В інерційних перетворювачах спрямованої дії пружний підвіс забезпечує збереження положення й орієнтації в абсолютному просторі, тому вони можуть видавати всі шість компонентів вібрації. У перетворювачах спрямованої дії забезпечується вимір тільки одного лінійного чи кутового компонента вібрації.

За фізичним явищем, покладеним в основу методу виміру параметрів механічних коливань, вимірювальні перетворювачі можна об'єднати в наступні основні групи: **механічні, акустичні**

(ультразвукові), електричні, електромагнітні (радіотехнічні), оптичні (світлові) і радіаційні.

1.2 Основні параметри віброперетворювачів

Віброперетворювачі характеризуються рядом параметрів, які дозволяють здійснити їх порівняння і зробити правильний вибір. Нижче приведені основні з них

- **вимірюваний параметр лінійної вібрації**: переміщення (S), швидкість (V), прискорення (a), різкість (r), частота (F), коефіцієнт нелінійних спотворень (φ) і т.і.;

- **діапазон значень вимірюваного параметра вібрації** для якого нормовані допустимі погрішності. Мінімальне значення вимірюваного параметра визначається напругою шуму узгоджуючого підсилювача:

$$\left(\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} \gg 6\text{дБ}\right);$$

- **дійсний коефіцієнт перетворення віброперетворювача** – відношення зміни сигналу на виході віброперетворювача до параметра вібрації на вході, що викликає цю зміну:

$$K_{\text{д}} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta V} = \frac{dE}{dV},$$

де: ΔE – зміна величини сигналу на виході;

ΔV – зміна вимірюваного параметра вібрації.

Якщо між E и V існує лінійна залежність, то:

$$K_{\text{д}} = \frac{E}{V} = \text{const}$$

- **порог чутливості** - мінімальна зміна вимірюваного параметра вібрації, що викликає відповідну зміну показань віброметра;

- **робочий діапазон частот гармонійних вібрацій** - діапазон частот, у межах якого нерівномірність амплітудно-частотної характеристики стосовно базової частоти 1000 Гц не перевищує встановленого значення;

- **основна погрішність віброперетворювача** (віброметра), яка визначається:

а) при постійному значенні величини вимірюваного параметра вібрації в межах виміру робочого діапазону частот (нерівномірність амплітудно-частотної характеристики);

б) при різних значеннях величини вимірюваного параметра на незмінній частоті в межах встановленого діапазону вимірів (нелінійність амплітудної характеристики).

- коефіцієнт поперечного перетворення віброперетворювача - відношення зміни сигналу на виході віброперетворювача, встановленого перпендикулярно напрямку діючих коливань, до параметра вібрації на вході, що викликає його зміну:

$$K_n = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta V} = \frac{dE}{dV},$$

де: ΔE – зміна величини сигналу на виході;

ΔV – зміна вимірюваного параметра вібрації.

Якщо між E і V існує лінійна залежність, то:

$$K_n = \frac{E}{V}$$

де E – максимальне значення сигналу при ряді вимірів у різних положеннях віброперетворювача.

- відносний коефіцієнт поперечного перетворення віброперетворювача – відношення коефіцієнта поперечного перетворення до коефіцієнта перетворення:

$$K_{on} = \frac{K_n}{K_d} \cdot 100$$

- можливість використання віброперетворювача для вимірів в експлуатаційних, лабораторних і виробничих умовах, а також для метрологічних цілей.

Для порівняння безконтактних методів виміру параметрів вібрації і заснованих на них вібровимірювальних перетворювачах доцільно користатися, крім перерахованих параметрів, ще деякими критеріями оцінки.

1) Характер фізичних полів або випромінювань, що взаємодіють у процесі вимірів

Характер взаємодії використовуваних фізичних полів коливальної енергії (механічних чи електричних хвильових явищ) з

поверхнею матеріалу виробу істотно залежить від умов їх поширення. В цьому випадку при використанні енергії електричних чи магнітних полів (радіотехнічного діапазону частот) необхідно враховувати електричні і магнітні властивості виробу.

Залежність можливості реалізації ряду безконтактних методів вимірів параметрів вібрації від характеру взаємодії використовуваної для вимірів коливальної енергії з матеріалом виробу приводить, у ряді випадків, до необхідності штучного додання поверхні виробу визначених властивостей (створення дзеркального відображення, забезпечення електропровідності і т.і.). Якщо при цьому відбувається помітна зміна габаритів і мас випробовуваних виробів, то даний метод не можна розглядати як безконтактний.

2) Зазор між віброуючим виробом і чуттєвим елементом віброперетворювача, а в ряді випадків і джерелом (випромінювачем) коливальної енергії, а також погрішність його установки

Величина зазору між віброуючим виробом і чуттєвим елементом віброперетворювача або джерелом (випромінювачем) коливальної енергії для ряду методів є дуже критичною, оскільки від неї залежить максимальна величина вимірюваної амплітуди переміщення, а також поріг чутливості віброперетворювача. Для деяких методів погрішність вимірів залежить не тільки від величини зазору, але і від співвідношення величини максимальної амплітуди переміщення (S_{max}) і величини зазору (S_0). В ряді випадків існують визначені вимоги до величини даного співвідношення (S_{max} / S_0). Наприклад, для безконтактного електретного віброперетворювача $S_{max} / S_0 \leq 0,1$.

3) Погрішність установки зазору

Поріг чутливості для ряду методів визначається максимальною величиною зазору, при якій сигнал на виході віброперетворювача виявляється порівняним з рівнем шумів або мінімальна зміна вимірюваного параметра вібрації викликає зміну показань віброметра, порівняну або меншу за відлік вимірюваної величини. Залежність характеристик точності деяких методів вимірів від граничних значень зазору, а в ряді випадків від точності його установки приводить до необхідності введення в розгляд параметра – погрішність установки зазору.

4) Роздільна здатність методу вимірів

Роздільна здатність методу вимірів характеризує його здатність забезпечувати роздільне спостереження і вимір параметрів вібрації близько розташованих друг до друга елементів конструкцій чи виробів. При вимірі лінійної вібрації варто користатися роздільною здатністю у площині і роздільною здатністю за зазором, тобто за відстанню від джерела (випромінювача) коливальної енергії до віброуючого елемента конструкції чи виробу.

Роздільною здатністю у площині називається мінімальна відстань між елементами конструкції чи виробу, розташованими в одній площині, при якій можливий роздільний вимір їхніх параметрів вібрації.

Роздільною здатністю за зазором називається мінімальна різниця зазорів між елементами конструкції чи виробу і віброперетворювача або джерелом (випромінювачем) коливальної енергії, при якій можливий роздільний вимір їхніх параметрів вібрації. При вимірах кутової вібрації варто користатися роздільною здатністю за зазором і роздільною здатністю за кутовими координатами.

Роздільною здатністю за кутовими координатами називається мінімальна різниця кутових координат елементов конструкції чи виробу, що знаходяться на однаковій відстані від віброперетворювача або джерела (випромінювача) коливальної енергії, при якій можливий роздільний вимір їхніх параметрів кутової вібрації.

5) Критичність до якості механічної розв'язки вібратора і віброуючого виробу з джерелом коливальної енергії або чуттєвим елементом віброперетворювача

Критичність до якості механічної розв'язки вібратора і віброуючого виробу з вібровимірювальною системою (випромінювача енергії і віброперетворювача) зв'язана з тим, що в основу безконтактних методів покладений кінематичний метод перетворень.

Для задоволення вимог до механічної розв'язки необхідне створення спеціальних конструкцій, складність і вартість яких залежить від реалізуемого метода. При цьому для ряду методів необхідно враховувати ступінь збігу паразитних коливань вібровимірювальної системи з робочим діапазоном частот вібрації, вимоги до роздільної здатності, фізичне явище перетворення.

Слід зазначити, що не всі параметри, що використовуються для оцінки контактних віброперетворювачів, можуть застосовуватись без

обмежень для оцінки безконтактних методів виміру параметрів вібрації і заснованих на них вібровимірювальних перетворювачів. Так, наприклад, застосування таких параметрів як коефіцієнт перетворення і коефіцієнт поперечного перетворення для безконтактних віброперетворювачів вимагає введення у визначення умов, що характеризують взаємодії використовуваних фізичних полів з поверхнею матеріалу виробу, а також обумовлюють величину зазору між віброючим виробом і чуттєвим елементом віброперетворювача (джерелом коливальної енергії), при якій визначаються зазначені коефіцієнти.

Можливість використання ряду безконтактних методів вимірів параметрів вібрації істотно залежить від впливу кліматичних факторів, що вимагає їхнього урахування при проектуванні і застосуванні віброперетворювачів, заснованих на зазначених методах.

1.3 П'єзоелектричні перетворювачі

Найбільш широке застосування для виміру параметрів вібрації одержали контактні п'єзоелектричні пасивні віброперетворювачі, побудовані на динамічному принципі.

Динамічний (інерційний) принцип дії віброперетворювачів полягає в тому, що вимір параметрів вібрації випробовуваного виробу заміняється виміром його змущених коливань відносно з'єданого з ним через пружний зв'язок (підвіс) інерційного елемента.

Відомо, що будь-яке фізичне тіло має властивість при прискореному русі створювати силову реакцію пропорційну масі m і прискоренню a :

$$F = m \cdot a$$

При наявності пружного зв'язку між виробом і інерційним елементом він не буде встигати за коливальними рухами випробовуваного виробу і буде відігравати роль інерційної системи відліку. Більшість сучасних інерційних віброперетворювачів заснована на використанні інерційних елементів, механічні коливання яких за допомогою перетворювачів перетворюються в електричні, а наявність у них пружного зв'язку з корпусом забезпечує необхідне дешифрування. З метою спрощення процесу вимірів і конструкцій віброперетворювачів, вони, в основному, виконуються односпрямованої дії і придатні для виміру одного лінійного чи

кутового компонента. Найбільше застосування одержали перетворювачі лінійних компонентів з вертикальною орієнтацією осі вимірів. Вважаючи, що коливальна система перетворювача інерційної дії, що має один ступінь свободи і вертикальну орієнтацію, лінійна і характеризується наступними зосередженими параметрами: масою m , коефіцієнтом пружності k і коефіцієнтом демпфірування h , можна записати рівняння руху у вигляді:

$$m \cdot \frac{d^2(y+s)}{dt^2} = -k \cdot (y + \delta_{cm}) - h \cdot \frac{dy}{dt} + ma \quad (1.1)$$

При цьому на масу інерційного елемента m діє сила тяжіння ma і враховується, що має місце розтягання пружного підвісу на величину статичної осадки d_{cm} . Оскільки початок відліку переміщення вибирається в положенні центра маси при рівновазі системи, то:

$$k \cdot d_{cm} = ma$$

Тоді рівняння (1.1) можна записати у вигляді:

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + h \cdot \frac{dy}{dt} + ky = -ma \quad (1.2)$$

Якщо припустити, що періодичні коливання мають синусоїдальний характер і виразити співвідношення між величинами в комплексній формі, тобто $S = S_a e^{j\Omega}$,

де S_a - амплітуда переміщення;

Ω - частота, що знаходиться в межах діапазону робочих частот ($\Omega_n \leq \Omega \leq \Omega_v$),

то рівняння (1.2) можна представити в наступному вигляді:

$$\left[(j\Omega)^2 + j\Omega h + k \right] y_a = -(j\Omega)^2 m S_a \quad (1.3)$$

Оскільки $\bar{S} = j\Omega \bar{S} = \frac{\bar{S}}{j\Omega}$, то рівняння (1.3) буде мати вигляд:

$$\left[(j\Omega)^2 \cdot m + j\Omega h + k \right] y_a = - m S_a \quad (1.4)$$

Користуючись рівнянням (1.4), можна отримати формули для амплітудно-частотної (1.5) і фазової (1.65) характеристик.

$$K_o = \frac{m}{\sqrt{(k - \Omega^2 m)^2 + \Omega^2 h^2}} \quad (1.5)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\Omega h}{k - \Omega^2 m} \quad (1.6)$$

За умови, що власна частота механічного резонансу коливальної системи перетворювача вище вищої частоти робочого діапазону частот вібрації ($\omega_0 \gg \Omega_B$), а згасання ($\nu = \frac{h}{2m}$) відносно мале ($2\Omega\omega_B \ll \omega_0^2$), амплітудно-частотна характеристика лінійна.

На підставі формул (1.3) і (1.4) можна зробити висновки про умови застосування вимірювальних перетворювачів інерційної дії.

1) Габаритні розміри і маси вимірювальних перетворювачів повинні бути досить малі, щоб вони не створювали зворотну дію на випробовувані вироби, а також, щоб забезпечувалися виміри вібрації в «точці», а не на «площині». Відомо, що швидкість поширення подовжніх коливань у твердих тілах складає $5 \cdot 10^3$ м/с. При впливі вібрації в механічних елементах конструкції перетворювача виникають стоячі хвилі, довжина яких виявляється порівнянною з габаритними розмірами зазначених елементів, у результаті чого форма частотної характеристики перетворювача спотворюється. Тому необхідно, щоб максимальний габаритний розмір перетворювача (L) був набагато менше довжини (λ) хвилі, що поширюється, тобто $L \leq \frac{\lambda}{12}$. При виконанні даної вимоги можна вважати, що

віброперетворювач дозволяє вимірювати параметри вібрації у визначеній точці випробовуваного виробу.

2) З метою зменшення габаритів перетворювача необхідно виготовляти інерційний елемент із металевих сплавів з великою щільністю.

3) Створення відновлючої сили, що забезпечує демпфірування інерційного елемента, досягається за допомогою спеціальних пружин, що забезпечують підвіс інерційного елемента до корпусу перетворювача. При виборі матеріалу пружини варто враховувати, що

величина коефіцієнта пружності виготовленої з нього пружини, істотно впливає на власну частоту механічного резонансу перетворювача, а також, що він визначає статичну міцність пружного підвісу. Необхідно також, щоб його припустима деформація була досить великою. При цьому межі пропорційності не повинні порушуватися.

4) Хоча найбільше застосування одержали перетворювачі спрямованої дії, при випробуваннях, у деяких випадках, на перетворювач може діяти довільна вібрація і тоді виникає питання, дія яких з компонентів вимірюється перетворювачем. Для зменшення чутливості перетворювача до компонентів, що не вимірюються, прибігають до різних конструктивних удосконалень.

Аналіз приведених вище умов застосування вимірювальних перетворювачів дозволяє зробити висновок про краще використання акселерометрів, а не велосиметрів, тому що вони можуть мати менші габарити і більш широкий частотний діапазон. Необхідність виміру параметрів вібрації в діапазоні високих частот обумовлена швидким розвитком швидкісних видів транспорту й особливо авіації і космонавтики.

В даний час найбільш широке застосування одержали контактні **п'єзоелектричні віброперетворювачі інерційної дії**. П'єзоелектричні віброперетворювачі засновані на використанні явищ **прямого і зворотного п'єзо ефектів**.

При прямому п'єзо ефекті під дією механічних сил на деякі речовини з кристалічною структурою виникає деформація елементарних комірок кристала, що приводить до зсуву позитивних і негативних іонів відносно друг друга, що викликає електричну поляризацію речовини.

При зворотному п'єзо ефекті вплив зовнішнього електричного поля викликає відносний зсув позитивних і негативних іонів, що приводить до деформації речовини.

П'єзо ефект найбільш виражений у таких матеріалах, як кварц, сегнетова сіль, титанат барія, цирконат титанату свинця (ЦТС), ряд інших матеріалів.

Основними параметрами, що характеризують п'єзо ефект є: **напруженість електричного поля ϵ , поляризація P (чи електрична індукція D), пружне напруження σ і деформація ξ .**

Пружне напруження (σ) визначається як сила, що діє на одиницю площі.

Деформація (ξ) обсягу п'єзоелемента супроводжується деяким його зсувом Y , який може бути представлений вектором з компонентами Y_x, Y_y, Y_z , спрямованими за осями симетрії кристала.

Поляризація P ізотропного діелектрика, поміщеного в електричне поле ε , визначається за формулою:

$$P = \aleph \varepsilon$$

де \aleph - коефіцієнт поляризації.

Величини P та ε є векторами.

Електрична індукція D :

$$D = E\varepsilon = E_0\varepsilon + P = \varepsilon(E_0 + \aleph), \left[\frac{k}{m^2} \right]$$

де E_0 – електрична стала;

E – діелектрична проникність діелектрика.

Якщо зневажити анізотропними властивостями діелектрика і припустити односпрямованість електричного поля, то математичне вираження **прямого п'єзоэффекта** має вигляд:

$$D = d \cdot \sigma \quad (1.7)$$

де d – п'єзомодуль, що характеризує взаємозалежність між механічними й електричними величинами;

σ - пружне напруження;

D – електрична індукція.

При цьому **зворотний п'єзоэффект** описується вираженням:

$$\xi = d \cdot \varepsilon_n \quad (1.8)$$

де ξ - деформація;

ε_n – напруженість електричного поля.

Значення п'єзомодуля різне для різних кристалічних речовин. З формул (1.7) і (1.8) витікає, що:

$$\left(\frac{D}{\sigma} \right)_{\varepsilon=0} = d \quad \text{і} \quad \left(\frac{\xi}{\varepsilon} \right)_{\sigma=0} = d \quad (1.9)$$

Індекс $\varepsilon = 0$ означає, що при прямому п'єзоєфекті напружений стан кристала створюється у відсутності зовнішнього електричного поля (тобто до обкладок кристала не підводиться зовнішня напруга).

Індекс $\sigma = 0$ означає, що при зворотному п'єзоєфекті створюється зовнішнє поле у відсутності напруг у кристалі. Звідси умова взаємної оборотності для прямого і зворотного п'єзоєфекта, яка має вигляд:

$$\left(\frac{D}{\sigma}\right)_{\varepsilon=0} = \left(\frac{\xi}{\varepsilon}\right)_{\sigma=0} \quad (1.10)$$

На підставі законів Кірхгофа і користаючись еквівалентною схемою п'єзоелектричного перетворювача можна скласти наступні рівняння:

$$L \frac{di}{dt} + r_{np} i + \frac{1}{c_0} \int i dt + r_{nc} i_1 - \mu_n \int v dt = 0$$

$$r_{nc} i_1 + \frac{1}{c_{nx}} \int (i_1 - i) dt = 0$$

Скориставшись рівнянням Ньютона після ряду перетворень, можна одержати вираз для напруги на п'єзоелементі:

$$U_{\text{эк}}(t) = -\frac{m}{\mu_n^2 c_0} \frac{d}{dt} V(t) \quad (1.11)$$

де m – маса інерційного елемента;

c_0 – власна електрична ємність п'єзоелемента при відсутності деформації;

μ_n – коефіцієнт електромеханічного перетворення п'єзоелемента:

$$\mu_n = \alpha f = \alpha \frac{(\Sigma)_{D=0}}{(E)_{D=0}} d = \alpha \frac{(\Sigma)_{\varepsilon=0}}{(E)_{\xi=0}} \quad (1.12)$$

де α – коефіцієнт, що залежить від форми і розмірів п'єзоелемента;

f – п'єзоелектрична стала;

Σ - модуль пружності;

$\frac{d}{dt}V(t)$ - віброприскорення.

З формули (1.11) видно, що напруга на виході п'єзоелектричного перетворювача пропорційна прискоренню.

Одним з основних параметрів віброперетворювачів є дійсний коефіцієнт перетворення (K_D), що характеризує чутливість перетворювача до прискорення. Користаючись вищезазначеними формулами, можна вивести рівняння для визначення K_D , що дає можливість проаналізувати амплітудно-частотну характеристику перетворювача:

$$K_D = \frac{U}{a_D} = \frac{\mu_n}{\omega_0^2} \frac{C_0}{\sqrt{(C_0 + C_{\text{вх}})^2 + \frac{1}{\Omega^2 r_{\text{вх}}^2}}} \cdot \frac{m}{\sqrt{(k - \Omega^2 m) + \Omega^2 h^2}} \quad (1.13)$$

де $C_{\text{вх}}$ – вхідна ємність разом із приведеною ємністю кабелю, обмірювані на вході вимірювальної системи;

Ω - частота коливань;

$r_{\text{вх}}$ – вхідний опір вимірювальної системи;

$k = (k)_{d=0}$ – коефіцієнт пружності п'єзоелемента при відсутності заряду;

h – коефіцієнт демпфірування.

В області нижчих частот можна зневажити сумою $C_0 + C_{\text{вх}}$ у порівнянні з $\frac{1}{\Omega \cdot r_{\text{вх}}}$ і тоді формула (1.13) приймає спрощений вигляд:

$$K_D = \mu_N \frac{r_{\text{вх}} \cdot C_0}{\omega_0} \cdot \frac{m}{\sqrt{(K - \Omega^2 m) + \Omega^2 h^2}} \left[\frac{Bc^2}{M} \right] \quad (1.14)$$

Аналіз приведеної вище формули показує, що амплітудно-частотна характеристика п'єзоперетворювача має завал в області низьких частот, що тим ближчий до $\Omega = 0$, чим сильніші нерівності:

$$\Omega R_{\text{вх}} (C_0 + C_{\text{вх}}) \gg 1$$

$$R_{\text{вх}} \gg \frac{1}{\Omega \cdot (C_0 + C_{\text{вх}})}$$

Фізично цей завал пояснюється тим, що заряди на гранях п'єзоперетворювача відносно швидко стікають через $R_{\text{вх}}$, через ізоляцію та поверхнею п'єзокристала. Тому зі зменшенням частоти коливань це стікання зарядів помітніше.

Зменшення завалу частотної характеристики досягається за рахунок застосування відповідних п'єзоматеріалів, поліпшення ізоляції, укорочення кабелю, використання у вимірювальній системі вхідних пристроїв з великим $R_{\text{вх}}$, а також включення додаткових конденсаторів, ємність яких дозволяє зсувати завал характеристики ближче до $W = 0$. З метою зменшення завалу амплітудно-частотної характеристики перетворювача в області нижчих частот доцільно збільшувати власну ємність C_0 за рахунок збільшення товщини кристала, що веде до зниження чутливості, але до зростання пружності K і зміни:

$$C_{\text{екз}} = \frac{\mu_n C_0^2}{K}$$

Ємність проводів (кабелів) оказує сильну шунтуючу дію на власну ємність перетворювача. Вона може бути порівнянна з ємністю перетворювача.

В області вищих частот амплітудно-частотна характеристика буде рівномірною, якщо виконується умова, за якою власна частота W_0 коливальної системи перетворювача значно вище частоти Ω_B в спектрі вібрації:

$$0 \leq \Omega_B \leq \omega_0$$

Амплітудно-частотна характеристика має підйом при наближенні до частоти резонансу.

Якщо ж у коливальну систему приладу вводиться демпфірування з показником загасання $\mathcal{D} = 1 + 1,7$, то смуга рівномірно переутворюваних коливань розширюється в область зовнішніх частот, охоплюючи й область резонансу.

Коефіцієнт перетворення п'єзоперетворювача в рівномірній частині амплітудно-частотної характеристики визначається формулою (1.16) за умови, що впливом демпфірування можна зневажити, тобто $h \rightarrow 0$, і виконується умова (1.15):

$$\frac{1}{\omega_H(C_0 + C_{ex})} \langle\langle R_{ex} \rangle\rangle \quad (1.15)$$

$$K_{\mathcal{L}} = \frac{\mu_n}{\omega_0^2} \frac{C_0}{C_0 + C_{ex}} \left[\frac{Bc^2}{M} \right] \quad (1.16)$$

Якщо для практичних розрахунків зневажити C_{ex} і прийняти, що:

$$\begin{aligned} (E)_{d=0} &= (E)_{\varepsilon=0} = E, \\ a(\varepsilon)_{\sigma=0} &= (\varepsilon)_{\xi=0} = 0 \end{aligned}$$

то при вертикальній орієнтації п'єзоелемента:

$$\begin{aligned} \mu_n &= \frac{E}{\varepsilon} d \\ K_{\mathcal{L}} &= \frac{\mu_n}{\omega_0^2} = \frac{dl}{s\varepsilon} m = \frac{dS_n}{s\varepsilon} lb\Delta \end{aligned} \quad (1.17)$$

де S_n , b і Δ – площа основи, висота і щільність матеріалу інерційного елемента відповідно.

Звідси власна частота визначається за формулою:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{\frac{SE}{S_n lb\Delta}} \quad (1.18)$$

Бажано, щоб п'єзоелектричний віброперетворювач мав великий коефіцієнт перетворення і високу власну частоту перетворення (ω_0) і ємність (C_0). Однак формули (1.17) і (1.18) показують, що ці вимоги можуть бути суперечливими.

Збільшення модуля пружності (E) підвищує власну частоту.

Збільшення діелектричної проникності збільшує власну ємність (C_0) і зменшує коефіцієнт перетворення.

Збільшення висоти п'єзоелемента й інерційного елемента (b) збільшує коефіцієнт перетворення, але знижує власну ємність (C_0).

Збільшення площі п'єзоелемента S_1 підвищує власну ємність (C_0), але вимагає відповідного збільшення площі інерційного елемента

S_n , щоб виконувалась умова $\frac{S_n}{S} \geq 1$.

Збільшення щільності матеріалу інерційного елемента (Δ), підвищує коефіцієнт перетворення, але знижує власну частоту (ω_0).

Таким чином, зменшення габаритів перетворювача зменшує коефіцієнт перетворення і власну ємність, але збільшує власну частоту механічного резонансу.

Для виготовлення п'єзоелектричних перетворювачів найчастіше застосовується п'єзокераміка ЦТС – цирконат титанат свинцю, що має високу чутливість (300 нК/Н), рівномірну температурну характеристику і забезпечує можливість виміру при температурах до 260 °С.

За принципом роботи п'єзоелектричні віброперетворювачі можуть класифікуватися на чотири основні групи.

До першої групи відносяться перетворювачі з інерційною масою, яка притискається за периферією до п'єзоелемента, що сприяє підвищенню їхньої чутливості. При цьому корпус виконується досить легким, але з твердою основою. Якщо частота вібрації набагато менше власної частоти механічного резонансу перетворювача, то прискорення інерційної маси буде рівним прискоренню місця установки перетворювача на випробовуваний виріб. При вібрації інерційна маса викликає перемінний стиск п'єзоелемента, що приводить до виникнення електричного заряду пропорційного коливальному прискоренню поверхні виробу, на яку встановлений віброперетворювач. Вимір величини заряду за допомогою спеціальної вимірювальної схеми, що підключається до виходу перетворювача, дозволяє визначити амплітуду прискорення, частоту і форму коливань при вібрації.

Переваги конструкції:

- найкращі амплітудні і амплітудно-частотні характеристики перетворювача;

- простота конструкції, міцність і наявність достатньо великого коефіцієнта перетворення при відносно малій вазі перетворювача.

Недоліки конструкції:

- залежність показань від зміни температури навколишнього середовища;

- чутливість до акустичних шумів;

- можливість деформації корпусу і основи перетворювача, що є частиною системи «підвіс – інерційна маса», під впливом деформації коливальної поверхні випробовуваного виробу.

До **другої групи** відносяться **перетворювачі, у яких інерційна маса, пружина і п'єзоелемент установлені на центральному затиску в середині твердої основи**. Корпус даної конструкції виконує тільки захисні функції. Перетворювачі другої групи позбавлені більшості зазначених недоліків перетворювачів першої групи.

До **третьої групи** відносяться **перетворювачі, у яких усувається вплив деформації підстави на п'єзоелемент за рахунок того, що інерційна маса, притиснута пружиною до п'єзоелементу, перевернена**.

Недоліком цієї конструкції є зменшення резонансної частоти внаслідок резонансів стінок корпусу, на які спираються інерційна маса і пружина.

Особливістю **четвертої групи** є те, що **п'єзоелемент виконано у формі циліндра** і напруга на обкладинках з'являється внаслідок зсуву при сприйнятті перетворювачем механічних коливань за напрямком осі поляризації, що збігається з віссю центрального затиску.

Переваги конструкції:

- незалежність від умов навколишнього середовища;

- малі габарити;

- можливість виміру параметрів вібрації на високих частотах.

Сигнал з перетворювача знімається з торцевих поверхонь, перпендикулярних до осі поляризації.

1.4 Електретні віброперетворювачі

Для виміру параметрів вібрації виробів електронної техніки й елементів конструкцій РЕЗ, маси і габарити яких порівнянні з масою і габаритами контактних віброперетворювачів, необхідно використовувати безконтактні віброперетворювачі. Одним з

можливих методів безконтактних вимірів параметрів вібрації, що мають практичне промислове застосування, є **електретний**.

Даний метод використовує явище електретного ефекту, заснований на електростатичній індукції поляризованих діелектриків (електретів). Ефект полягає в наведенні вільних електричних зарядів на токопровідних поверхнях виробів, що наближаються до електретів. При цьому поверхнева щільність заряду визначається за формулою:

$$\sigma_{инд} = \frac{\sigma}{\frac{S\varepsilon}{d} + 1} \quad (1.19)$$

де σ - поверхнева щільність заряду електрета;

S – зазор між електретом і провідною поверхнею виробу;

d – товщина електрета;

ε - діелектрична проникність матеріалу електрета.

Під впливом періодичної вібрації зазор змінюється за законом:

$$S = S_0 + S(t)$$

де S_0 – початковий зазор між поверхнями електрета і виробів;

$S(t)$ – закон зміни амплітуди переміщення виробів при вібрації.

При гармонійній вібрації $S(t) = S_0 \sin \Omega t$

Зміна зазору приводить до зміни наведених зарядів у часі і до появи струму в ланцюзі електрет – вимірювальний прилад – провідна поверхня виробу:

$$i = \frac{dq}{dt} = P \frac{d\sigma_{инд}}{e\varepsilon} = \frac{P\varepsilon\omega}{d\left(\frac{S\varepsilon}{d} + 1\right)^2} \frac{dS(t)}{dt} \quad (1.20)$$

де P – площа поверхні елемента.

З виразу (1.20) витікає, що безконтактний електретний віброперетворювач є джерелом струму, який пропорційний швидкості вібрації $\left(\frac{dS(t)}{dt}\right)$. Напруга на опір навантаження:

$$Z_H = \frac{R_H}{1 + j\Omega^2 C_\varepsilon^2 R_H^2}$$

визначається виразом, що дозволяє оцінити амплітудно-частотну характеристику віброперетворювача:

$$U_{\text{ввх}} = iZ_H = \frac{P\varepsilon\sigma R_H \Omega S_a \cos\Omega t}{d\left(\frac{S\varepsilon}{d} + 1\right)^2 \cdot (1 + \Omega^2 C_\varepsilon^2 R_H^2)}, \quad (1.21)$$

при цьому:

$$C_\varepsilon = C_0 + C_{\text{вх}} + C_{\text{к}}$$

де C_0 – ємність електричного віброперетворювача;

$C_{\text{вх}}$ – вхідна ємність вхідного пристрою;

$C_{\text{к}}$ – ємність кабелю.

Аналіз виразу (1.21) дозволяє зробити висновок, що для зменшення залежності $U_{\text{ввх}}$ від частоти необхідне виконання умови:

$$(\Omega C_\varepsilon R_H)^2 \ll 1$$

З цією метою прагнуть зменшити постійну часу $\tau = C_\varepsilon R_H$.

Розміщаючи вхідний пристрій вимірювального приладу (віброметра) в одному корпусі з перетворювачами та виконуючи його за схемою джерельного повторювача на польовому транзисторі, можна зменшити $C_{\text{и}}$ і $C_{\text{вх}}$. Зменшення R_H недоцільне, тому що веде до збільшення рівня власних шумів і зниженню чутливості.

Дослідження показують доцільність виконання безконтактних електричних віброперетворювачів з тонких полімерних плівок фторопласта-4 (політетрафторотилена), що мають велику поверхневу щільність заряду ($\sigma = 20 \cdot 10^{-9}$ Кл/см²), допускають можливість збереження в незакороченому стані, мають гарну повторюваність і прості в експлуатації. Для установки початкового зазору (S_0) між електрикою і виробом у конструкції віброперетворювача застосований мікрометричний гвинт. Безконтактний електричний віброперетворювач дозволяє робити виміри параметрів вібрації металевих металізованих виробів, причому виключається залежність показань від товщини і провідних властивостей металу виробів.

Електричний віброперетворювач є пасивним (генераторним) і, отже, не вимагає для своєї роботи постійного джерела енергії.

3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

- 3.1 Отримати у викладача зразок віброперетворювача. Визначити його тип.
- 3.2 Описати принцип його дії.
- 3.3 Перерахувати основні параметри та галузь застосування запропонованого віброперетворювача.

4 ЗМІСТ ЗВІТУ

- 4.1 Тема та мета роботи.
- 4.2 Відповіді на контрольні запитання.
- 4.3 Результати аналізу запропонованого віброперетворювача.
- 4.4 Висновки з роботи.

5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 5.1 Класифікація віброперетворювачів.
- 5.2 Основні параметри віброперетворювачів
- 5.3 Основні критерії оцінки безконтактних віброперетворювачів.
- 5.4 П'єзоэффект та його основні параметри.
- 5.5 Умови застосування віброперетворювачів інерційної дії.
- 5.6 Причини нерівномірності АЧХ п'єзоелектричних віброперетворювачів.
- 5.7 Умови створення оптимальної конструкції п'єзоелектричного віброперетворювача.
- 5.8 Класифікація п'єзоелектричних віброперетворювачів за принципом дії.
- 5.9 Принцип дії електретних віброперетворювачів.
- 5.10 Умови вимірювань за допомогою електретних віброперетворювачів.

ЛІТЕРАТУРА

- 1.Глудкин О.П.Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС.-М .: Вища школа, 1991.-336 с.
- 2.Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: Учеб. пособие для вузов /О.П. Глудкин, А.Н. Енгальчев, А.И. Коробив, Ю.В. Трегубов; Под ред. А.И. Коробова.-М.: Радио и связь, 1987.-272 с.: ил.