

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет "Запорізька політехніка"

РОБОЧА ПРОГРАМА ТА
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до самостійної, контрольної та індивідуальної роботи з
дисципліни

"Методи та засоби дослідження РЕЗ"

для студентів спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми
«Радіoeлектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні
технології мікросистемної радіoeлектронної техніки»)
усіх форм навчання

Робоча програма та методичні вказівки до самостійної, контрольної та індивідуальної роботи з дисципліни "Методи та засоби дослідження РЕЗ" для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми «Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Поспеева І.Є., Коновалова І.П. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2019. – 56 с.

Укладач : Поспеева Ірина Євгенівна, ст. викладач,
Коновалова Ірина Петрівна, зав. лаб. каф. ІТЕЗ

Рецензент: Фарафонов Олексій Юрійович, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск: Шилю Галина Миколаївна, доктор техн. наук, доцент, зав. каф. ІТЕЗ

Затверджено
на засіданні кафедри ІТЕЗ
протокол № 1 від 28.08.19 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
протокол № 1 від 02.09.19 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ	6
1.1 Мета дисципліни	6
1.2 Задачі дисципліни	6
1.3 Рекомендації з вивчення дисципліни	6
2 ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ТА ПИТАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	7
2.1 Програма навчальної дисципліни.....	7
2.2 Питання для самостійної роботи	9
3 ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ ТА ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ	13
4 ВИМІРЮВАЛЬНІ ВІБРОПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ВВП).....	14
4.1 Теоретичні відомості	14
4.1.1 Класифікація ВВП.....	14
4.1.2 Основні параметри ВВП.....	16
4.1.3 Критерії оцінки безконтактних ВВП.....	18
4.1.4 Особливості застосування інерційних ВВП	21
4.1.5 Конструкції та особливості роботи ВВП різного принципу дії	24
4.1.5.1 Ємнісні ВВП.....	24
4.1.5.2 Індуктивні та електромагнітні ВВП.....	25
4.1.5.3 Тензометричні ВВП.....	27
4.1.5.5 Електретні ВВП	33
4.1.5.6 П'єзоелектричні ВВП - принцип дії та особливості роботи	38
4.1.5.7 П'єзоелектричні ВВП - особливості конструкції	43
4.1.5.8 Інші види ВВП	48
4.2 Завдання до роботи	51
4.3 Порядок виконання роботи	52
4.4 Контрольні запитання.....	52
ЛІТЕРАТУРА.....	53

ВСТУП

Випробування РЕЗ являють собою експериментальне визначення при різних впливах кількісних і якісних характеристик виробів при їх функціонуванні. При цьому як самі вироби, так і впливи можуть бути змодельовані.

Цілі випробувань різні на різних етапах проектування і виготовлення РЕЗ. До основних цілей випробування, загальних для всіх видів РЕЗ, можна віднести:

- вибір оптимальних конструктивно-технологічних рішень при створенні нових виробів;
- доведення виробів до необхідного рівня якості;
- об'єктивну оцінку якості виробів при їх постановці на виробництво, в процесі виробництва і при технічному обслуговуванні;
- прогнозування гарантованого терміну служби.

Випробування служать ефективним засобом виявлення прихованих випадкових дефектів матеріалів і елементів конструкції, не виявлених методами технічного контролю. За результатами випробувань виробів у виробництві можна встановити причини зниження якості. Якщо ці причини встановити не вдається, вдосконалюють методи і засоби контролю виробів і технологічні процеси (ТП) їх виготовлення.

На кінцевих етапах ТП виготовлення виробу можуть проводитися попередні випробування. Для них вибирають такі режими, щоб вони забезпечували відмови виробів, що містять приховані дефекти, і в той же час не виробляли ресурсу тих виробів, які не містять дефектів. Ці випробування часто називають технологічними тренуваннями (термострумове тренування, електротренування, термоциклічне тренування та ін.).

У результаті вивчення дисципліни студент повинен отримати:
загальні компетентності:

- здатність проведення досліджень на відповідному рівні;
- здатність оцінювати та забезпечувати якість робіт;
- навички використання інформаційних і комунікаційних

технологій;

- вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми;
- вільне володіння українською мовою;

фахові компетентності:

• вміння проводити розробку і дослідження методик аналізу, синтезу, оптимізації та прогнозування якості процесів функціонування радіоелектронних пристроїв, систем та комплексів;

• вміння здійснювати постановку та проведення випробувань РЕЗ за заданою методикою і аналіз результатів;

• здатність проводити аналіз результатів проведення випробувань, здійснювати вибір оптимальних рішень.

Студент повинен:

знати:

• основи теорії випробувань, класифікацію випробувань та видів устаткування для їх проведення; методики проведення випробувань;

вміти:

• формувати вимоги до випробувань на підставі технічних вимог до виробу, розробляти програми й методики лабораторних випробувань конкретних виробів, що враховують вплив зовнішніх факторів, яким може піддаватися виріб у процесі експлуатації;

• проводити обґрунтований вибір устаткування для випробувань й засобів виміру, робити метрологічну експертизу устаткування для випробувань й засобів виміру.

Вивчення дисципліни базується на знаннях таких дисциплін, що передбачені навчальним планом підготовки бакалаврів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» освітніх програм «Радіоелектронні апарати та засоби», «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки»: "Основи проектування електронної апаратури", "Зовнішні впливи на електронні апарати та засоби захисту".

1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

1.1 Мета дисципліни

Метою дисципліни є вивчення основ теорії випробувань та устаткування для випробувань і засобів виміру, що дозволяють відтворити умови зовнішніх впливів, а також отримання практичних навичок розробки програм й методик випробувань.

1.2 Задачі дисципліни

У процесі вивчення дисципліни студент повинен сформувати знання щодо ролі випробувань у справі підвищення якості радіо-, електронно-обчислювальної та мікро- і наносистемної техніки, методів її випробувань на впливи різноманітних зовнішніх факторів та обладнання для їх проведення для забезпечення якості виробів.

1.3 Рекомендації з вивчення дисципліни

Навчальна робота над дисципліною складається з наступних компонентів: прослуховування лекцій; виконання та захист лабораторних робіт; виконання індивідуальних завдань, самостійне вивчення матеріалу за літературою, що рекомендується.

Вивчення курсу завершується складанням іспиту за умови успішного виконання усіх складових курсу.

Самостійне вивчення матеріалу слід проводити згідно з програмою навчальної дисципліни та питаннями до самостійної роботи, що наведені у розділі 2, дотримуючись наступного порядку:

- ознайомлення з темою, що підлягає вивченню за програмою, та добір літератури зі списку, що рекомендується;
- вивчення матеріалу за рекомендованою літературою з конспектуванням основних положень теми;
- виконання контрольного завдання, яке відноситься до теми, що вивчається.

Студенти денної форми навчання виконують індивідуальне завдання.

Студенти заочної форми навчання виконують контрольну роботу.

2 ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ТА ПИТАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

2.1 Програма навчальної дисципліни

Програмою даної дисципліни передбачається вивчення наступних тем.

Змістовий модуль 1. Основи теорії випробувань

Тема 1. Поняття якості та засоби її забезпечення. Фактори, що визначають якість РЕЗ:

- підвищення якості виробів; роль випробувань і контролю в підвищенні якості виробів радіоелектроніки;
- властивості, що визначають якість: конструктивні, технологічні, економічні, ергономічні;
- роль стандартизації та сертифікації у підвищенні якості;
- фактори, що визначають якість РЕЗ, їх класифікація, причини виникнення, основні параметри.

Тема 2. Основні поняття теорії випробувань. Класифікація випробувань:

- цілі та завдання випробувань;
- класифікація випробувань за різними класифікаційними ознаками: в залежності від зовнішніх факторів, за умовами, місцем, технологією та організацією проведення, за програмними цілями і призначенням, за тривалістю проведення, за цільовим результатом впливу випробувань на стан виробу, за характером укрупненого визначення параметрів.

Тема 3. Загальні принципи проведення випробувань. Програма та методика випробувань:

- загальні принципи проведення випробувань;
- програма випробувань;
- методика випробувань;
- загальна структура і методичні принципи проведення випробувань на механічні впливи;
- загальна структура і методичні принципи проведення випробувань на кліматичні впливи.

Тема 4. Віброперетворювачі:

- класифікація віброперетворювачів;

- основні параметри віброперетворювачів;
- критерії оцінки безконтактних віброперетворювачів;
- особливості застосування інерційних віброперетворювачів;
- конструкції та особливості роботи ВВП різного принципу дії: ємнісні, індуктивні, тензометричні, електретні, п'єзоелектричні та інші.

Змістовий модуль 2. Методики випробувань РЕЗ на зовнішні впливи. Автоматизація випробувань

Тема 5. Випробування РЕЗ на механічні впливи

- випробування на механічний резонанс;
- випробування на вібростійкість;
- випробування на віброміцність;
- обладнання для випробувань на вібраційні впливи;
- випробування на ударну міцність і стійкість;
- обладнання для випробувань на ударні впливи;
- випробування на вплив лінійного прискорення;
- випробування на вплив акустичного шуму.

Тема 6. Випробування РЕЗ на кліматичні впливи

- випробування на температурні впливи;
- обладнання для випробувань на температурні впливи;
- випробування на вплив підвищеної вологості;
- обладнання для випробувань на вплив підвищеної вологості;
- випробування на вплив інею і роси;
- випробування на вплив соляного туману;
- випробування на зовнішній вплив води;
- випробування на вплив тиску;
- випробування на вплив пилу;
- випробування на вібростійкість;
- випробування на вплив сонячного випромінювання;
- випробування на герметичність.

Тема 7. Випробування РЕЗ на біологічні впливи

- випробування на вплив цвілевих грибів;
- випробування на стійкість матеріалів до дії комах;
- випробування на стійкість матеріалів до впливу гризунів.

Тема 8. Спеціальні види випробувань РЕЗ

- випробування на радіаційні впливи;

- спеціальні космічні випробування.

Тема 9. Автоматизація випробувань:

- сучасні САПР для випробувань РЕЗ, їх основні характеристики та особливості застосування;
- загальні висновки щодо можливостей застосування САПР при випробуваннях РЕЗ.

2.2 Питання для самостійної роботи

Змістовий модуль 1

- 1 Поняття якості. Властивості, що визначають якість: конструктивні, технологічні, економічні, ергономічні.
- 2 Роль випробувань і контролю в підвищенні якості виробів радіоелектроніки.
- 3 Роль стандартизації та сертифікації у підвищенні якості.
- 4 Класифікація факторів, що визначають якість виробів на усіх стадіях їх життєвого циклу. Внутрішні фактори.
- 5 Зовнішні фактори, що впливають (ЗВФ) та їх класифікація.
- 6 Вплив ЗВФ на роботу РЕЗ.
- 7 Основні поняття теорії випробувань. Цілі та завдання випробувань.
- 8 Класифікація випробувань за умовами та місцем проведення.
- 9 Класифікація випробувань за видом дії.
- 10 Класифікація випробувань за програмними цілями та призначенням.
- 11 Класифікація випробувань на різних етапах життєвого циклу виробу.
- 12 Класифікація випробувань за тривалістю проведення.
- 13 Класифікація випробувань за результатом дії на стан виробу.
- 14 Класифікація випробувань за характеристикою об'єкта.
- 15 Загальні принципи проведення випробувань.
- 16 Програма випробувань. Зміст розділів.
- 17 Методика випробувань.
- 18 Загальна структура методики випробувань на механічні впливи.
19. Вимоги до обладнання для випробувань на механічні впливи.

20 Загальна структура методики випробувань на кліматичні впливи.

21 Вимоги до обладнання для випробувань на кліматичні впливи.

22 Особливості проведення випробувань на кліматичні впливи на різних стадіях проектування.

23 Нормалізована послідовність кліматичних випробувань.

24 Класифікація віброперетворювачів.

25 Основні параметри віброперетворювачів.

26 Критерії оцінки безконтактних віброперетворювачів..

27 Особливості застосування інерційних віброперетворювачів.

28 Ємнісні віброперетворювачі.

29 Індуктивні та електромагнітні віброперетворювачі.

30 Тензометричні віброперетворювачі.

31 Чуттєвість тензодатчиків та її залежність від матеріалу

32 Електретний ефект та його основні параметри.

33 Умови вимірювань за допомогою електретних віброперетворювачів.

34 Особливості конструкцій електретних віброперетворювачів.

35 П'єзоефект та його основні параметри.

36 Причини нерівномірності АЧХ п'єзоелектричних віброперетворювачів.

37 Умови створення оптимальної конструкції п'єзоелектричного віброперетворювачів.

38 Особливості конструкцій п'єзоелектричних віброперетворювачів.

39 Оптичні та радіаційні віброперетворювачі.

40 Мікроелектромеханічні віброперетворювачі.

Змістовий модуль 2

41 Випробування на визначення резонансних частот конструкції.

42 Випробування на наявність резонансних частот конструкції в заданому діапазоні частот.

43 Випробування на вібростійкість при впливі синусоїдальної вібрації.

44 Випробування на вібростійкість при впливі широкопasmової випадкової вібрації.

45 Випробування на віброміцність методом частоти, що хитається.

46 Випробування на віброміцність методом фіксованих частот у всьому діапазоні.

47 Випробування на віброміцність шляхом впливу широкопasmової випадкової вібрації.

48 Обладнання для випробувань на вібраційні впливи.

49 Випробування на ударну міцність.

50 Випробування на ударну стійкість.

51 Випробування на вплив одиночних ударів.

52 Обладнання для випробувань на ударні впливи.

53 Випробування на вплив лінійного прискорення.

54 Випробування на вплив випадкового акустичного шуму.

55 Випробування на вплив акустичного шуму мінливої частоти.

56 Випробування на вплив підвищеної температури.

57 Випробування на вплив зниженої температури.

58 Випробування на вплив зміни температури середовища.

59 Обладнання для випробувань на температурні впливи.

60 Випробування на вплив підвищеної вологості, безперервний режим.

61 Випробування на вплив підвищеної вологості, циклічний режим.

62 Обладнання для випробувань на вплив підвищеної вологості.

63 Випробування на вплив інею та роси.

64 Випробування на вплив соляного туману.

65 Випробування на зовнішній вплив води.

66 Випробування на вплив зниженого атмосферного тиску.

67 Випробування на вплив підвищеного атмосферного тиску.

68 Випробування на вплив статичного гідравлічного тиску.

69 Випробування на вплив статичного пилу (піску).

70 Випробування на вплив динамічного пилу (піску).

71 Випробування на вплив сонячного випромінювання.

72 Випробування на герметичність.

73 Випробування на вплив цвілевих грибів.

74 Випробування на стійкість матеріалів до дії комах.

75 Випробування на стійкість матеріалів до впливу гризунів.

76 Випробування на радіаційні впливи.

77 Спеціальні космічні випробування.

78 Комплексні космічні випробування.

79 Системи САПР, що застосовуються для автоматизації випробувань.

80 Порівняльні характеристики систем САПР для випробувань та загальні висновки щодо їх застосування.

Під час самостійної підготовки слід користатися нормативно-технічною документацією [9-14], конспектами лекцій [15, 16], вказаною літературою [18, 20-23] та даними методичними вказівками.

3 ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ ТА ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ

Студенти денної форми навчання в процесі самостійного вивчення дисципліни виконують індивідуальну роботу.

Студенти заочної форми навчання в процесі самостійного вивчення дисципліни виконують контрольну роботу.

Індивідуальна (контрольна) робота полягає у виконанні практичного завдання на тему: "Вимірювальні віброперетворювачі".

При виконанні індивідуальної (контрольної) роботи рекомендується користуватися нормативно-технічною документацією [9-14], конспектами лекцій [15, 16], вказаною літературою [18, 20-23] та даними методичними вказівками.

Крім того, допускається користуватися будь-якою доступною навчальною і технічною літературою, а також інтернет-ресурсами.

Принципи дії та конструкції віброперетворювачів різної дії наведені у [28], [29].

Конструкції та характеристики п'єзоелектричних віброперетворювачів наведені у [30], [32].

Конструкція та характеристики оптичного віброперетворювача наведена у [31].

Конструкція та характеристики мікроелектромеханічного віброперетворювача наведена у [32].

4 ВИМІРЮВАЛЬНІ ВІБРОПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ВВП)

Мета роботи: практичне знайомство з видами, принципами дії, основними параметрами та конструкціями ВВП, що застосовуються для проведення механічних випробувань радіо-, електронно-обчислювальної та мікро- і наносистемної техніки.

4.1 Теоретичні відомості

4.1.1 Класифікація ВВП

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 (**вібропроксиметри**), швидкості (**вібровелосиметри**) і прискорення (**віброакселерометри**).

Джерелом сигналу вимірювальної інформації про значення вимірюваних параметрів вібрації служить спеціальний датчик - конструктивно виділена сукупність перетворювальних елементів, що сприймає від об'єкта вимірювань фізичну величину, яку треба заміряти, та перетворює її у сигнал вимірюваної інформації, зручний для обробки у наступних ланках вимірювального ланцюга.

Для вимірювання параметрів вібрації служить **вібровимірювальний перетворювач або вимірювальний віброперетворювач - ВВП**.

Сучасні ВВП в основному, побудовані на принципах електричних вимірів неелектричних величин (сигналів), коли механічні коливання перетворюються в електричні.

ВВП класифікуються за рядом незалежних ознак.

За призначенням ВВП можуть використовуватись для виміру різних параметрів вібрації.

У залежності від вимірюваного параметру вібрації ВВП розділяються на **акселерометри** – для виміру прискорення, **велосиметри** – для виміру швидкості та **проксиметри** - для виміру переміщення.

За фізичним явищем, покладеним в основу методу виміру параметрів механічних коливань, ВВП можна об'єднати в наступні основні групи: **механічні, акустичні (ультразвукові), електричні, електромагнітні (радіотехнічні), оптичні (світлові) і радіаційні.**

Ще одна класифікаційна ознака пов'язна з *потребами ВВП у додаткових джерелах енергії*.

Для роботи деяких видів ВВП використовується тільки механічна енергія перетворюваного сигналу. Такі ВВП називають **генераторними**, або **пасивними**. До пасивних перетворювачів відносяться п'єзоелектричні, електретні та ін.

Інші види ВВП окрім вхідної механічної енергії потребують ще додаткового постійного джерела енергії. Вони зветься **параметричними, модуляторними або активними**. До активних перетворювачів відносяться фотоелектричні, гамма-квантові, ємнісні та ін.

За зв'язком (взаємодією) сприймаючої (чуттєвої) частини з об'єктом виміру розрізняють **контактні і безконтактні ВВП**. Застосування контактних чи безконтактних перетворювачів залежить від розмірів і маси вібруючих виробів. Якщо розміри і маси виробів порівнянні або менші за розміри і маси контактних перетворювачів, то необхідно застосовувати безконтактні вимірювальні перетворювачі.

За принципом виміру щодо системи відліку ВВП 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 вигляді інерційного елемента, що з'єднується з вібруючим 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 родом вимірюваних компонентів вібрації розрізняють ВВП для виміру лінійних компонентів коливань (однокомпонентні, двокомпонентні, трикомпонентні), а також для виміру кутових компонентів.

За напрямком прикладення сили при механічних впливах розрізняють ВВП 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.

4.1.2 Основні параметри ВВП

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

4.1.2.1 Вимірюваний параметр лінійної вібрації: переміщення (S), швидкість (v), прискорення (a), різкість (r), частота (F), коефіцієнт нелінійних спотворень (ϕ) і т.ін.

4.1.2.2 Діапазон значень вимірюваного параметра вібрації, для якого нормовані допустимі погрішності.

Мінімальне значення вимірюваного параметра визначається напругою шуму узгоджуючого підсилювача:

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

4.1.2.3 Дійсний коефіцієнт перетворення ВВП – відношення зміни сигналу на виході ВВП 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:

$$K_d = \frac{E}{V} = \text{const}.$$

4.1.2.4 Поріг чуттєвості - мінімальна зміна вимірюваного параметра вібрації, що викликає відповідну зміну показань віброметра.

4.1.2.5 Робочий діапазон частот гармонійних вібрацій - діапазон частот, у межах якого нерівномірність амплітудно-частотної характеристики стосовно базової частоти 1000 Гц не перевищує встановленого значення.

4.1.2.6 Основна погрішність ВВП (віброметра), яка визначається:

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

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

4.1.2.7 Коефіцієнт поперечного перетворення ВВП - відношення зміни сигналу на виході ВВП, 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 и V існує лінійна залежність, то:

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

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

4.1.2.8 Відносний коефіцієнт поперечного перетворення ВВП – відношення коефіцієнта поперечного перетворення до коефіцієнта перетворення:

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

4.1.2.9 Можливість використання ВВП для вимірів в експлуатаційних, лабораторних і виробничих умовах, а також для метрологічних цілей.

4.1.3 Критерії оцінки безконтактних ВВП

Для порівняння безконтактних методів виміру параметрів вібрації і заснованих на них ВВП доцільно користатися, крім вказаних вище параметрів, ще деякими критеріями оцінки.

4.1.3.1 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 певних властивостей (створення дзеркального відображення, забезпечення електропровідності і т.ін.). Якщо при цьому відбувається помітна зміна габаритів і мас випробовуваних виробів, то даний метод не можна розглядати як безконтактний.

4.1.3.2 Зазор між вібруючим виробом і чуттєвим елементом ВВП, а в ряді випадків і джерелом (випромінювачем) коливальної енергії, а також погрішність його установки

Величина зазору між вібруючим виробом і чуттєвим елементом ВВП або джерелом (випромінювачем) коливальної енергії для ряду методів є дуже критичною, оскільки від неї залежить максимальна величина вимірюваної амплітуди переміщення, а також поріг чуттєвості ВВП.

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 певні вимоги до величини даного співвідношення.

Наприклад, для безконтактного електретного ВВП $S_{max}/S_0 \leq 0,1$.

4.1.3.3 Погрішність установки зазору

Поріг чуттєвості для ряду методів визначається максимальною величиною зазору, при якій сигнал на виході ВВП 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 такого параметра, як погрішність установки зазору.

4.1.3.4 Роздільна здатність методу вимірів

Роздільна здатність методу вимірів характеризує його здатність забезпечувати роздільне спостереження і вимір параметрів вібрації близько розташованих один до одного 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 вібруючого 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 ВВП 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 елементів конструкції чи виробу, що знаходяться на однаковій відстані від ВВП або джерела (випромінювача) коливальної енергії, при якій можливий роздільний вимір їхніх параметрів кутової вібрації.

4.1.3.5 Критичність до якості механічної розв'язки вібратора і вібруючого виробу з джерелом коливальної енергії або чуттєвим елементом ВВП

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

Для забезпечення вимог до механічної розв'язки слід створювати спеціальні конструкції, 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, а також фізичне явище перетворення і вимоги до роздільної здатності.

Крім того, слід зазначити, що не всі параметри, що використовуються для оцінки контактних ВВП, 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 ВВП вимагає введення у визначення умов, що характеризують взаємодії використовуваних фізичних полів з поверхнею матеріалу виробу, а також обумовлюють величину зазору між вібруючим виробом і чуттєвим елементом ВВП (джерелом коливальної енергії), при якій визначаються ці коефіцієнти.

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

4.1.4 Особливості застосування інерційних ВВП

Динамічний (інерційний) принцип дії ВВП полягає в тому, що вимір параметрів вібрації випробовуваного виробу заміняється виміром його змущених коливань відносно з'єднаного 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 ВВП 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 ВВП, 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 відносно вісі y у вигляді:

$$m \cdot \frac{d^2(y + y_0)}{dt^2} = -k \cdot (y + \delta_{cm}) - h \cdot \frac{dy}{dt} \quad (4.1)$$

При цьому на масу інерційного елемента m діє сила тяжіння ma і вважається, що має місце розтяг пружного підвісу на величину статичної осадки δ_{cm} .

Оскільки початок відліку переміщення вибирається в положенні центра маси при рівновазі системи, то:

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

Тоді рівняння (4.1), вважаючи початкове переміщення y_0 нульовим, можна записати у вигляді:

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + h \cdot \frac{dy}{dt} + ky = -ma \quad (4.2)$$

Припустимо, що періодичні коливання мають синусоїдальний характер і виразимо 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 ($\Omega_n \leq \Omega \leq \Omega_b$).

Тоді рівняння (4.2) можна представити в наступному вигляді:

$$[(j\Omega)^2 \cdot m + j\Omega h + k]y_a = -(j\Omega)^2 m S_a \quad (4.3)$$

Оскільки $\bar{S} = j\Omega \bar{S} = \frac{\bar{S}}{j\Omega}$, то рівняння (4.3) буде мати вигляд:

$$[(j\Omega)^2 \cdot m + j\Omega h + k]y_a = -m S_a \quad (4.4)$$

Користуючись рівнянням (4.4), можна отримати формули для амплітудно-частотної (4.5) і фазової (4.6) характеристик.

$$K_\phi = \frac{m}{\sqrt{(k - \Omega^2 m)^2 + \Omega^2 h^2}} \quad (4.5)$$

$$\phi = \arctg \frac{\Omega h}{k - \Omega^2 m} \quad (4.6)$$

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 ($2\Omega\omega_0 \ll \omega_0^2$), амплітудно-частотна характеристика лінійна.

На підставі формул (4.5) і (4.6) можна зробити висновки про умови застосування ВВП інерційної дії.

4.1.4.1 Габаритні розміри і маси інерційних ВВП 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 менший за довжину (λ) хвилі, що поширюється, тобто $L \leq \frac{\lambda}{12}$. При

виконанні даної вимоги можна вважати, що ВВП дозволяє вимірювати параметри вібрації у визначеній точці випробовуваного виробу.

4.1.4.2 З метою зменшення габаритів перетворювача необхідно виготовляти інерційний елемент із металевих сплавів з великою густиною.

4.1.4.3 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.

4.1.4.4 Хоча найбільше застосування отримали ВВП спрямованої дії, у деяких випадках при випробуваннях на перетворювач може діяти довільна вібрація і тоді виникає питання, дія яких з компонентів вимірюється перетворювачем. Для зменшення

чуттєвості перетворювача до компонентів, що не вимірюються, прибігають до різних конструктивних удосконалень.

Аналіз приведених вище умов застосування ВВП інерційної дії дозволяє зробити висновок про доцільніше 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.

4.1.5 Конструкції та особливості роботи ВВП різного принципу дії

На рис. 4.1 наведені варіанти конструкцій різноманітних ВВП.



Рисунок 4.1 - Варіанти конструкцій ВВП

Далі розглянемо детальніше ВВП різного призначення та принципу дії.

4.1.5.1 Ємнісні ВВП

Ємнісні ВВП потребують додаткового джерела живлення, тому відносяться до ВВП параметричного (активного) типу.

Принцип дії заснований на залежності ємності між провідниками від їх взаємного розташування, розмірів та властивостей середовища між ними.

Для плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta}$$

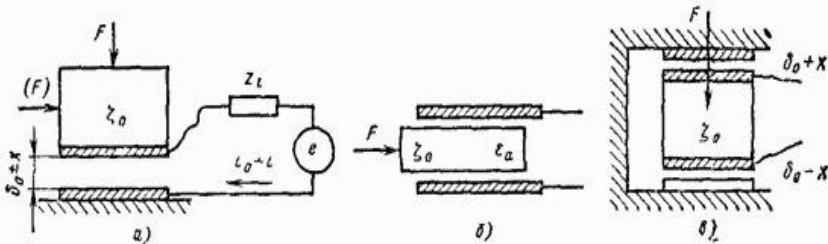
де: ε - діелектрична проникність міжелектродного простору;

S - площа електродів;

δ - зазор між електродами.

Варіанти принципів схем ємнісних ВВП наведені на рис.

4.2.



а - зі змінним зазором (площею); б - зі змінною електричною проникністю; в - диференційний

Рисунок 4.2 - Варіанти ємнісних ВВП

При живленні ємнісного ВВП від джерела змінного струму струм через нього протікає, навіть якщо ємність не змінюється, та може служити мірою ємності для любого закону її зміни.

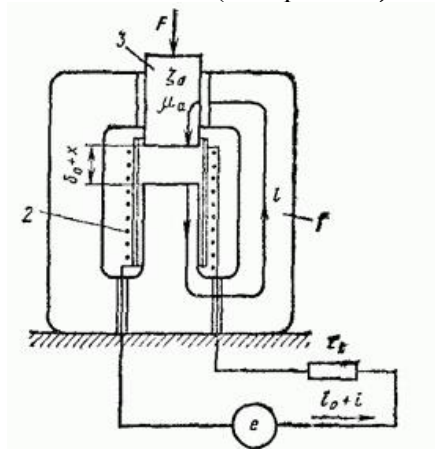
Чутливість ємнісних ВВП залежить від геометричних розмірів, напруги живлення та стабільності конструктивних елементів. Найчастіше вони застосовуються для виміру малих та надмалих переміщень.

4.1.5.2 Індуктивні та електромагнітні ВВП

Індуктивні ВВП також потребують додаткового джерела живлення, тому відносяться до ВВП активного типу.

Принцип дії індуктивних ВВП заснований на використанні залежності індуктивності контуру зі струмом або двох взаємозв'язаних контурів від їх розмірів, форми, розташування та магнітної проникності середовища.

Так, індуктивність котушки з магнітним осереддям, що має зазор, залежить від його величини (див. рис. 4.3).



1 - нерухоме осереддя; 2 - котушка; 3 - рухоме осереддя

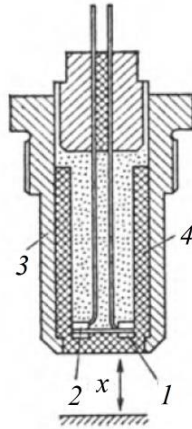
Рисунок 4.3 - Принцип дії індуктивного ВВП

Індуктивні вібропросиметри застосовують для виміру малих переміщень - до 1 мкм.

До *електромагнітних ВВП* відноситься вихрострумний проксиметр, принцип дії якого заснований на зміні індуктивності котушки при наближенні до неї електропровідного тіла.

Постійна напруга живлення перетворювача подається на генератор, який генерує високочастотний сигнал, що діє на котушку, а вона випромінює цей сигнал у навколишнє середовище у вигляді магнітного поля. При відсутності поблизу котушки електропровідного матеріалу втрат потужності радіочастотного сигналу немає і вихідна напруга генератора максимальна. При наближенні до робочого торця котушки об'єкта з електропровідного матеріалу, наприклад, валу, вихрові струми, що генеруються на його поверхні, приводять до втрати потужності сигналу і пропорційного зменшення вихідної напруги генератора. При цьому зазор між торцем перетворювача та об'єктом контролю буде пропорційним вихідній напрузі.

Конструкція такого ВВП наведена на рис. 4.4.



1 - робоча котушка; 2 - котушка температурної компенсації; 3 - корпус; 4 - ізоляційна втулка

Рисунок 4.4 - Конструкція вихрострумowego проксиметра

Він відноситься до активних безконтактних кінематичних ВВП, має підсилювач сигналів і генерує напругу на виході, пропорційну відстані до обертового вала.

Вихрострумний датчик безконтактно вимірює відносне переміщення вала в межах зазору підшипника, на якому він встановлений. При коливаннях зазору між валом і датчиком, закріпленим на опорі, змінюються частота або амплітуда електромагнітних параметрів, пропорційних частоті і значенню амплітуди зазору. Для вимірювання радіальної вібрації датчики встановлюють парами під кутом 90° перпендикулярно валу. Це робить можливим візуалізацію на екрані осцилографа орбіти руху вала та полярної діаграми траєкторії центру вала в радіальній площині.

4.1.5.3 Тензометричні ВВП

Тензометричні перетворювачі (тензодатчики) відносяться до ВВП параметричного (активного) типу.

Вони служать для вимірів деформацій і механічної напруги в елементах несучих конструкцій. Вони можуть також

використовуватися для вимірів інших механічних величин (тиску, вібрації, прискорення і ін.), які попередньо перетворюються в деформацію.

Робота тензодатчиків заснована на зміні активного опору матеріалу при його механічній деформації.

Зміна активного опору провідника відбувається з двох причин: по-перше, змінюються його геометричні розміри (довжина l , перетин S); по-друге, при деформації змінюється питомий опір ρ матеріалу провідника, а саме ці величини і визначають його активний опір:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Чуттєвість тензодатчиків визначається як відношення величини відносної зміни опору до відносної зміни лінійного розміру:

$$k = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$$

Цей параметр значною мірою залежить від коефіцієнта Пуасона μ , який для більшості металів дорівнює 0,24...0,5:

$$k \approx 1 + 2\mu$$

Але оскільки при цьому ще змінюється густина матеріалу, а завдяки цьому і концентрація носіїв заряду, а також деформується кристалічна гратка, k може бути значно більшим. Для металів його значення доходить до 22, а для напівпровідників - на порядок більше.

У якості матеріалу тензодатчиків використовуються різні метали та їх сплави у вигляді дроту, фольги або плівки, а також напівпровідники.

Найчастіше тензодатчики кріпляться до конструкції за допомогою клею, тому їх можна віднести до активних контактних безінерційних ВВП.

На рис. 4.5 наведена конструкція найпростішого **дротового тензодатчика**.

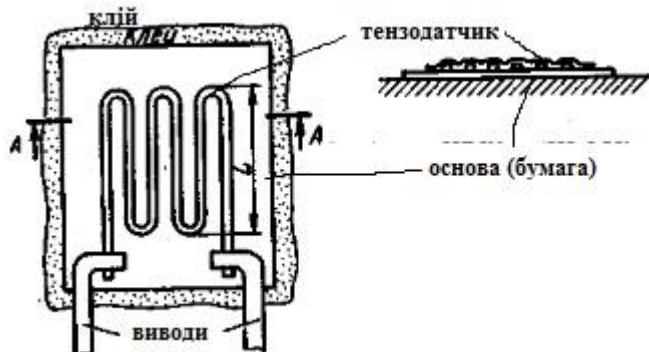


Рисунок 4.5 - Конструкція дротового тензодатчика

За конструктивним параметрами тензодатчики підрозділяються на датчики з малою базою ($L = 0,4 \dots 4$ мм); із середньою базою ($L = 4 \dots 25$ мм); з великою базою ($L > 25$ мм).

Активний опір датчиків з малою базою $5 \dots 100$ Ом, з середньою базою - $100 \dots 400$ Ом, з великою базою до 1000 Ом.

Ширина датчиків від 3 до 60 мм.

Довжина висновків датчиків складає $20 \dots 80$ мм.

Матеріалами для таких тензодатчиків служать сплави металів з великим питомим опором: константан, ніхром, манганін, хромель, залізохромонікелевий сплав, енлівар, тощо.

Фольгові тензодатчики виготовляють методом фотохімічного травлення.

Гратка такого датчика виконується з різних сплавів (мідь з нікелем, срібло з золотом та ін.), які забезпечують достатню чуттєвість і в той же час мають надійне зчеплення (адгезію) з ізоляційною основою, на якій виконується датчик.

Плівкові тензодатчики виготовляють шляхом напилення шару германію, телуру, вісмуту або сульфідів свинцю на еластичну ізоляційну основу з слюди або кварцу.

На відміну від дротових фольгові і плівкові тензодатчики мають ґратки не круглого, а прямокутного перетину з дуже великим співвідношенням ширини до висоти.

У порівнянні з дротовими вони мають ряд переваг.

Завдяки великій площі зіткнення струмопровідних смужок датчика з деталлю забезпечуються хороші умови тепловіддачі. Це

дозволяє в декілька разів підвищити щільність струму фольгових датчиків і в десятки разів - щільність струму плівкових датчиків (до 10^3 А/мм^2).

Завдяки великому відношенню периметра перетину плоскої смуги до площі її перерізу поліпшується сприйнятливість до деформації і точність її вимірювання.

Чуттєвість плівкових датчиків досягає 50.

Завдяки збільшеному перетину кінців фольгової та плівкової ґратки збільшується надійність пайки (або приварювання) виводів датчика.

Фольгові датчики мають товщину провідного покриття 3...15 мкм.

Опір фольгових датчиків знаходиться в межах 30...300 Ом.

Фотохімічний спосіб дозволяє виконати будь якої рисунок ґратки, що також є перевагою фольгових датчиків.

На рис. 4.6 показані різні типи фольгових тензодатчиків.

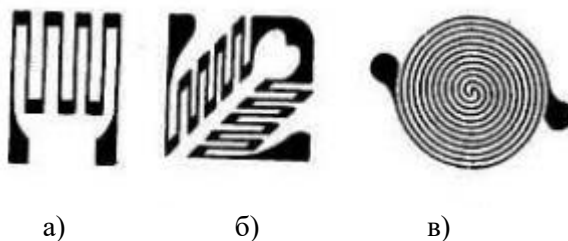


Рисунок 4.6 - Конструкції фольгових тензодатчиків

Конструкція, наведена на рис. 4.5а призначена для вимірювання лінійних переміщень; 4.5 б - розетка з двох датчиків, що дозволяє вимірювати деформації в двох взаємно перпендикулярних напрямках; 4.5 в - датчик, призначений для наклеювання на мембрану і вимірювання тиску.

У напівпровідникових тензодатчиках використовуються кристалічні напівпровідникові матеріали.

Принцип дії такий же, як і у дровових тензодатчиків: зміна активного опору через механічну деформацію самого провідника і

зміну питомого опору. Але якщо в металевих провідниках головною є зміна розмірів, то в напівпровідниках - зміна питомого опору.

Найбільш помітний тензоефект спостерігається в таких напівпровідниках, як германій Ge, кремній Si, з'єднання індію In, галію Ga.

Чуттєвість тензодатчиків з напівпровідників значно вища, ніж у тензодатчиків зі сплавів металів. На неї впливають орієнтування дії сил (кристалографічні напрямки), а також наявність домішок і температура.

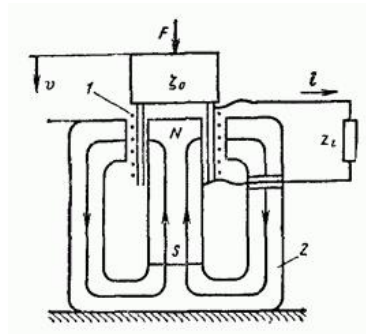
Найбільшого поширення набули германієві і кремнієві тензодатчики, причому останні здатні працювати при високих температурах (до 540°C) і великих механічних навантаженнях.

4.1.5.4 Електродинамічні ВВП

Принцип дії електродинамічного ВВП заснований на двох фізичних явищах: електромагнітної індукції та силової взаємодії електричного струму з магнітним полем, які виражаються законами Фарадея та Ампера.

Вони не потребують джерела живлення, тому відносяться до ВВП генераторного (пасивного) типу.

Принцип дії електродинамічного ВВП можна пояснити за допомогою рис. 4.7.



1 - котушка; 2 - магнітна система

Рисунок 4.7 - Принцип дії електродинамічного ВВП

Під дією зовнішньої сили F котушка 1 рухається вздовж вісі магнітної системи 2, пересікаючи силові лінії радіального магнітного поля, внаслідок чого виникає ЕРС індукції, яку можна визначити за формулою:

$$e_m = -Blv$$

де: B - магнітна індукція;

l - загальна довжина проводу у магнітному полі;

v - відносна вісьова швидкість руху котушки.

В свою чергу, якщо у ланцюгу котушки протікає електричний струм i , то на провідник у магнітному полі буде діяти сила:

$$F_e = Bli$$

Таким чином, цей вид перетворювачів є оборотним з коефіцієнтом зв'язку $\mu = Bl$.

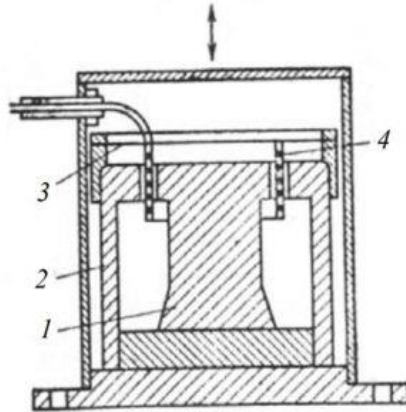
Існує багато різновидів перетворювачів такого типу, наприклад, з плоскою котушкою у однорідному магнітному полі, з рухомим магнітом, з перетворюванням лінійної швидкості в кутову і т.ін.

Електродинамічні ВВП мають великий вихідний сигнал та високу чутливість до швидкості, тому найчастіше застосовуються як велосиметри для вимірювання низько- та середньочастотної вібрації, яка обмежується величиною 2000 Гц.

На рис. 4.8 наведений один з варіантів конструкції електродинамічного велосиметра.

Конструктивно датчик виконаний у вигляді циліндричного корпусу, в якому розташована котушка індуктивності на пружному підвісі, всередині якої розташований магніт. При коливаннях корпусу датчика котушка індуктивності починає коливатися під дією сили інерції, перетинаючи магнітне поле, при цьому в котушці виникає ЕРС, амплітуда і частота якої пропорційні швидкості і частоті коливань корпусу датчика, прикріпленого до досліджуваної поверхні.

Такий ВВП належить до генераторних контактних інерційних ВВП.



1 - магніт; 2 - магнітопровід; 3 - розрізні пружини; 4 - котушка як інерційний елемент

Рисунок 4.8 - Конструкція електродинамічного велосиметра

4.1.5.5 Електретні ВВП

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

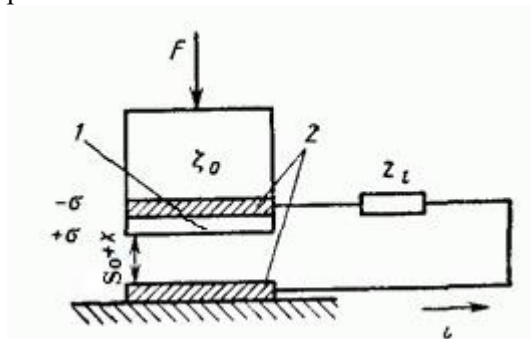
Даний метод використовує явище електретного ефекту, заснований на електростатичній індукції поляризованих діелектриків (електретів). Джерело енергії при цьому не потрібне, тому такі ВВП відносяться до ВВП генераторного (пасивного) типу.

Електретом називається діелектрик, який здатен поляризуватися і потім тривалий час зберігати поляризований стан після зняття зовнішнього впливу, яке призвело до поляризації (або зарядження) цього діелектрика, створюючи в навколишньому просторі квазістале електричне поле. Таким чином, електрет є електричним аналогом постійного магніту.

Електретний ефект виникає при відповідній обробці діелектрика (нагрів та охолодження у електричному полі, гама- або електронне опромінювання тощо) та полягає в наведенні вільних електричних зарядів на струмопровідних поверхнях виробів, що наближаються до електретів.

Полярізація не є рівноважною та поступово зменшується за рахунок релаксаційних процесів. Але для електретів час релаксації складає від кількох місяців до 10 років, причому на початку поверхнева густина зарядів σ зменшується досить швидко, а потім процес стабілізується. Стабільність σ суттєво залежить від об'ємної та поверхневої електропровідності матеріалу та стану навколишнього середовища. При збереженні на повітрі відбувається швидка нейтралізація поверхневих зарядів іонами, що завжди є у повітрі.

Принцип роботи електретного перетворювача можна пояснити за допомогою рис. 4.9.



1 - електрет; 2 - електроди

Рисунок 4.9 - Принцип дії електретного ВВП

Тут рухомим є електрод 1, але для роботи перетворювача несуттєво, який саме електрод рухається, важливою є тільки зміна їх взаємного розташування.

Електретний ВВП є конденсатором, ємність якого визначається за формулою:

$$C_0 = \frac{P}{\frac{d}{\varepsilon} + S}$$

де: P - площа поверхні електрета;

d - товщина електрета;

ε - абсолютна проникність матеріалу електрета;

S - зазор між електретом та електродом.

При цьому поверхнева густина заряду визначається за формулою:

$$\sigma_{ind} = \frac{\sigma}{\frac{S\varepsilon}{d} + 1} \quad (4.7)$$

де σ - поверхнева густина заряду 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:

$$i = \frac{dq}{dt} = P \frac{d\sigma_{ind}}{ve} = \frac{P\varepsilon\omega}{d\left(\frac{S\varepsilon}{d} + 1\right)^2} \frac{dS(t)}{dt} \quad (4.8)$$

З виразу (4.8) витікає, що безконтактний електретний ВВП є джерелом струму, який пропорційний швидкості вібрації $\left(\frac{dS(t)}{dt}\right)$.

Опір навантаження:

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

Напруга на ньому визначається виразом, що дозволяє оцінити амплітудно-частотну характеристику ВВП:

$$U_{вих} = iZ_H = \frac{P\varepsilon\sigma R_H \Omega S_a \cos \Omega t}{d\left(\frac{S\varepsilon}{d} + 1\right)^2 \cdot (1 + \Omega^2 C_\varepsilon^2 R_H^2)} \quad (4.9)$$

При цьому:

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

де C_0 – ємність електретного ВВП;

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

$C_{\text{к}}$ – ємність кабелю.

Аналіз виразу (4.9) дозволяє зробити висновок, що для зменшення залежності $U_{\text{вих}}$ від частоти необхідне виконання умови:

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

З цієї метою прагнуть зменшити постійну часу $\tau = C_{\varepsilon} R_H$.

Розміщаючи вхідний пристрій вимірювального приладу (віброметру) в одному корпусі з перетворювачами та виконуючи його за схемою джерельного повторювача на польовому транзисторі, можна зменшити $C_{\text{к}}$ і $C_{\text{вх}}$.

Зменшення R_H недоцільне, тому що веде до збільшення рівня власних шумів і зниженню чутливості.

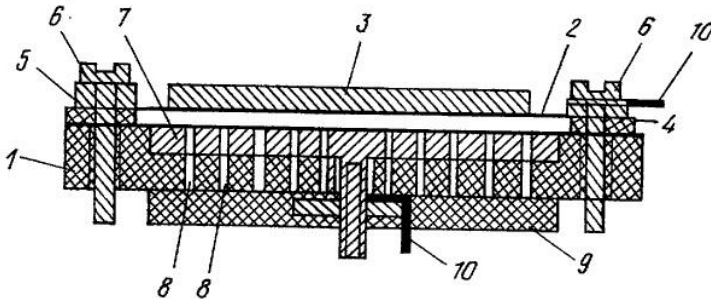
В електретних ВВП можна застосовувати діелектрики будь-якого виду.

У технічних цілях найчастіше застосовуються електрети, отримані з тонких неполярних фторполімерних плівок товщиною 10...25 мкм, які можуть бути з одного боку покриті тонким шаром металу, найчастіше алюмінію. Металевий шар наносять методом вакуумного розпилення. Він служить одним з електродів пристрою, в якому використовуються електрети. Електрет електризується, як правило, у коронному розряді з боку вільної поверхні полімеру і має в діелектрику надлишкові заряди одного знаку (моноелектрет).

Дослідження показують доцільність виконання безконтактних електретних ВВП з тонких полімерних плівок фторопласта-4 (політетрафторетилена), що мають велику поверхневу густину заряду σ . Після термообробки у електричному полі напруженістю 10^9 В/м вона становить близько $2 \cdot 10^{-12}$ Кл/м², та протягом місяця зменшується до $8 \cdot 10^{-13}$ Кл/м², після чого лишається незмінною, зменшуючись не більше, ніж на 10% у рік. ВВП на основі фторопласта-4 допускають можливість збереження в незакороченому стані, мають гарну повторюваність і прості в експлуатації.

Іноді у якості діелектрика для електретних ВВП використовують також кераміку титанату кальцію CaTiO_3 .

Варіант конструкції одного з найстаріших електретних ВВП наведений на рис. 4.10.



1 - корпус, 2 - пружний елемент, на поверхню якого напилена електретна плівка (перший електрод), 3 - інерційна маса, 4 - ізоляційна прокладка, 5 - електропровідна шайба, яка контактує з електродом на пружному елементі, 6 - гвинт, 7 - другий електрод, у тілі якого розміщені отвори 8, 9 - захисна прокладка (з фетру), 10 - контакти

Рисунок 4.10 - Конструкція електретного ВВП SU 1171668

Для установки початкового зазору (S_0) між електретом і виробом у конструкції ВВП застосовують мікрометричний гвинт.

Електретні ВВП використовуються, в основному, при вимірюваннях пульсацій тиску, а також вібрацій звукових частот. Будучи безконтактними, вони дозволяють робити виміри параметрів вібрації металевих металізованих виробів, причому виключається залежність показань від товщини і провідних властивостей металу виробів.

4.1.5.6 П'єзоелектричні ВВП - принцип дії та особливості роботи

У сучасній техніці вимірювання параметрів вібрацій найбільш розповсюдженими є вібровимірювальні прилади з п'єзоелектричними ВВП. У порівнянні з ВВП інших типів п'єзоелектричні мають більш високу чуттєвість, більш широкий діапазон частот, стабільні параметри, просту конструкцію, малі габарити, масу і вартість.

П'єзоелектричні ВВП засновані на використанні явищ прямого і зворотного п'єзоефектів.

При прямому п'єзоефекті під дією механічних сил на деякі речовини з кристалічною структурою виникає деформація елементарних комірок кристала, що приводить до зсуву додатно та від'ємно заряджених іонів відносно друг друга, що викликає електричну поляризацію речовини.

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

П'єзоефект найбільш виражений у таких матеріалах, як кварц, сегнетова сіль, титанат барію, цирконат титанату свинцю (ЦТС), ряд інших матеріалів.

Основними параметрами, що характеризують п'єзоефект, є: напруженість електричного поля $\mathcal{E}$, 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) об'єму 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 $\mathcal{E}$, визначається за формулою:

$$P = \aleph \mathcal{E}$$

де $\aleph$ - коефіцієнт поляризації.

Величини P та $\mathcal{E}$ є векторами.

Електрична індукція D :

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

де E_0 – електрична стала;

ε – діелектрична проникність діелектрика.

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

$$D = d \cdot \sigma \quad (4.10)$$

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

При цьому **зворотний п'єзоефект** описується виразом:

$$\xi = d \cdot \varepsilon_n \quad (4.11)$$

де ε_n – напруженість електричного поля.

Значення п'єзомодуля різне для різних кристалічних речовин. З формул (4.10) і (4.11) витікає, що:

$$\left(\frac{D}{\sigma} \right)_{\varepsilon=0} = d \quad \text{і} \quad \left(\frac{\xi}{\varepsilon} \right)_{\sigma=0} = d \quad (4.12)$$

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

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

$$\left(\frac{D}{\sigma} \right)_{\varepsilon=0} = \left(\frac{\xi}{\varepsilon} \right)_{\sigma=0} \quad (4.13)$$

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

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

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

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

$$U_{\text{эк}}(t) = -\frac{m}{\mu_n^2 c_0} \frac{d}{dt} V(t) \quad (4.14)$$

де m – маса інерційного елемента;

C_0 – власна електрична ємність п'єзоелемента при відсутності деформації;

μ_n – коефіцієнт електромеханічного перетворення п'єзоелемента, який визначається за формулою:

$$\mu_n = \alpha f = \alpha \frac{(\Sigma)_{D=0}}{(E)_{D=0}} d = \alpha \frac{(\Sigma)_{\varepsilon=0}}{(E)_{\xi=0}} \quad (4.15)$$

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 (4.14) видно, що напруга на виході п'єзоелектричного перетворювача пропорційна прискоренню.

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

$$K_{\mathcal{D}} = \frac{U}{a_{\mathcal{D}}} = \frac{\mu_n}{\omega_0^2} \cdot \frac{C_0}{\sqrt{(C_0 + C_{\text{вх}})^2 + \frac{1}{\Omega^2 r_{\text{вх}}^2}}} \cdot \frac{m}{\sqrt{(k - \Omega^2 m) + \Omega^2 h^2}} \quad (4.16)$$

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 (4.16) приймає спрощений вигляд:

$$K_{\mathcal{D}} = \mu_N \frac{r_{\text{вх}} \cdot C_0}{\omega_0} \cdot \frac{m}{\sqrt{(K - \Omega^2 m) + \Omega^2 h^2}} \left[\frac{Bc^2}{m} \right] \quad (4.17)$$

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:

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

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

Фізично цей завал пояснюється тим, що заряди на гранях п'єзоперетворювача відносно швидко стікають через $R_{\text{вх}}$, через ізоляцію та поверхню 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 $\Omega = 0$. 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 чуттєвості, але до зростання пружності K та зміни:

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

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

В області вищих частот амплітудно-частотна характеристика буде рівномірною, якщо виконується умова, за якою власна частота ω_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 $\mathcal{Q} = 1 + 1,7$, 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 (4.19) за умови, що впливом демпфірування можна знехтувати, тобто $h \rightarrow 0$, і виконується умова (4.18):

$$\frac{1}{\omega_H \cdot (C_0 + C_{\text{вх}})} \ll R_{\text{вх}} \quad (4.18)$$

$$K_d = \frac{\mu_n}{\omega_0^2} \frac{C_0}{C_0 + C_{\text{вх}}} \left[\frac{Bc^2}{m} \right] \quad (4.19)$$

Якщо для практичних розрахунків зневажити $C_{\text{вх}}$ і прийняти:

$$(E)_{d=0} = (E)_{\varepsilon=0} = E,$$

$$a(\varepsilon)_{\sigma=0} = (\varepsilon)_{\xi=0} = 0$$

то при вертикальній орієнтації п'єзоелемента:

$$\mu_n = \frac{E}{\varepsilon} d$$

$$K_d = \frac{\mu_n}{\omega_0^2} = \frac{dl}{s\varepsilon} m = \frac{dS_n}{s\varepsilon} lb\Delta \quad (4.20)$$

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

Звідси власна частота визначається за формулою:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{\frac{SE}{S_n lb\Delta}} \quad (4.21)$$

Бажано, щоб п'єзоелектричний ВВП мав великий коефіцієнт перетворення і високу власну частоту перетворення (ω_0) і ємність (C_0). Однак формули (4.20) і (4.21) 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 густини 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.

4.1.5.7 П'єзоелектричні ВВП - особливості конструкції

Конструкцію п'єзоелектричного ВВП, заснованого на прямому п'єзоэффекті, можна представити таким чином.

До жорсткої основи або корпусу кріпиться за допомогою клею або якимось іншим чином чуттєвий елемент, який являє собою пластину з п'єзоелектричного матеріалу - п'єзоелемент. До нього кріпиться також за допомогою клею або притискується пружиною інерційний елемент (тягар).

Під час дії механічних коливань з прискоренням a на корпус ВВП інерційний елемент з масою m тисне на п'єзоелемент, викликаючи його деформацію.

Сила $F = ma$ пропорційна прискоренню інерційного елемента, а тому й прискоренню об'єкта, на якому встановлений ВВП. В результаті на електродах п'єзоелемента генерується змінна напруга, пропорційна прискоренню.

Конструкція п'єзоелектричного ВВП складається з чуттєвого елемента (п'єзоелемента), жорсткої основи, захисного корпусу та з'єднувального кабелю. Вона повинна бути герметичною та забезпечувати захист чуттєвого елемента від зовнішніх електричних та інших впливів.

За конструктивними особливостями п'єзоелектричні ВВП 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 чуттєвості. 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 ВВП. 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 основи 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:

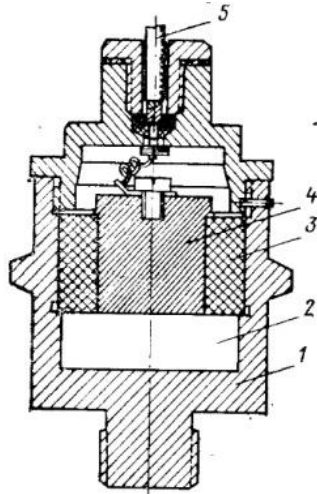
- незалежність від умов навколишнього середовища;

- малі габарити;

- можливість виміру параметрів вібрації на високих частотах.

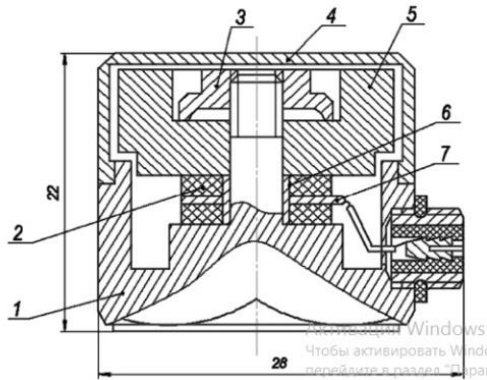
Сигнал з перетворювача знімається з торцевих поверхонь, перпендикулярних до осі поляризації.

На рис. 4.11 - 4.15 наведені варіанти конструкцій та зовнішній вид деяких п'єзоелектричних ВВП інерційної дії, заснованих на прямому п'єзоєфекті.



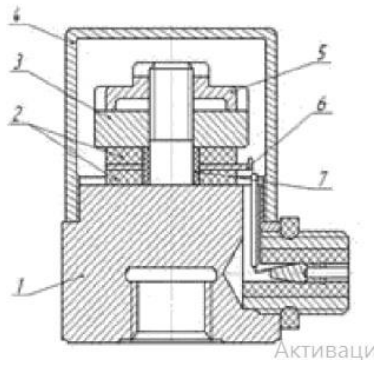
1 - корпус, 2 - п'єзоелемент, 3 - ізолятор, 4 - інерційна маса (тягар), 5 - вивід

Рисунок 4.11 - Конструкція п'єзоелектричного ВВП типу ВЗЧ



1 - основа, 2 - п'єзоелементи, 3 - гайка пружинна, 4 - кришка, 5 - інерційна маса (тягар), 6 - втулка, 7 - контакт

Рисунок 4.12 - Конструкція п'єзоелектричного ВВП типу ДН-3



1 - основа, 2 - п'єзоеlement, 3 - інерційна маса (тягар), 4 - кришка, 5 - гайка, 6 - контакт, 7 - втулка

Рисунок 4.13 - Конструкція п'єзоелектричного ВВП типу ДН-4



Рисунок 4.14 - П'єзоелектричний ВВП ЛВП-А



Рисунок 4.15 - П'єзоелектричний ВВП ЛВП-Б

Для виготовлення п'єзоелектричних перетворювачів найчастіше застосовується п'єзокераміка ЦТС – цирконат титанат свинцю, що має високу чуттєвість (300 нК/Н), рівномірну температурну характеристику і забезпечує можливість виміру при температурах до 260⁰С.

Для з'єднання п'єзоелектричних ВВП з вимірювальним пультом слід застосовувати спеціальний антивібраційний кабель, у якому ізоляція покривається спеціальним напівпровідниковим шаром, щоб запобігти виникненню паразитних електричних зарядів.

Найчастіше застосовуються кабелі марок АВК-1, АВК-2, АВК-3, АВК-6, АВКЕ-1, АВКТ-3, АВКТ-4, АВКТ-5, АВКЕР, АВКЕРУ, які мають високу стабільність антишумових властивостей в часі в умовах кліматичних і механічних впливів.

4.1.5.8 Інші види ВВП

Існує ще ряд ВВП, у основу роботи яких покладені різноманітні фізичні ефекти.

Конструкція **оптичного ВВП** у розрізі наведена на рис. 4.16.

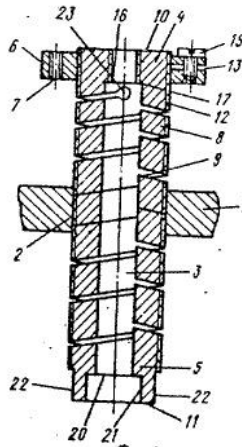


Рисунок 4.16 - Конструкція оптичного ВВП SU 1415070

Особливістю конструкції є те, що пружні підвіси втулок 4 та 5 виконані з віддзеркалюючими поверхнями 10, 11 на торцях. Інерційні елементи 6 являють собою пружину 3 з перерізом у формі

паралелограма, на зовнішніх поверхнях якої виконані відрізки гвинтової лінії, що створюють у стиснутому стані пружини безперервну різьбу.

Для того, щоб встановити ВВП, на об'єкті попередньо нарізають різьбу, що відповідає розміру різьби пружини 3.

Усередині ВВП за його віссю розміщують стискуючий елемент та шляхом загвинчування його у одну з втулок 4 або 5, стискають пружину 3 до створення безперервної гвинтової лінії, після чого пружину вгвинчують у отвір до необхідної довжини та видаляють стискуючий елемент.

Оптичний ВВП, встановлений у тіло конструкційного елемента, служить перетворювачем-концентратором потенційної енергії вимірюваної системи у кінетичну енергію мас кінцевих ділянок самого оптичного ВВП. Ці маси підвішені на пружних зв'язках та являють собою консервативну механічну систему слабодемпфованих коливань, критерії стійкості якої визначають її власні параметри.

Контроль положень віддзеркалюючих плоскостей 10, 11 циліндричних втулок 4, 5 з розгорткою за часом та координатами відбувається за допомогою двокоординатного цифрового автоколіматора. Відмічаючи максимальне відхилення променя автоколіматора за відомою частотою власних коливань інерційних мас можна розрахувати амплітуди та фази коливань конструктивних елементів у досліджуваних точках конструкції.

Принцип дії **радіаційних (гама-квантових) ВВП** заснований на використанні ефекту Месбауера, який полягає у резонансному поглинанні гама-квантів деякими речовинами. Під дією вібрації відбувається зміна резонансного поглинання гамма-квантів джерела в поглиначі внаслідок ефекту Доплера. При цьому на досліджуваному об'єкті розміщується речовина, що випромінює ці гама-кванти.

Компенсаційний ВВП представляє собою інерційну систему, в якій застосовується автоматичне урівноваження вимірюваного параметра вібрації за допомогою зворотного перетворювача.

Останнім часом особливий інтерес викликають **мікроелектромеханічні ВВП**.

Прикладом може бути група мікроелектромеханічних ВВП серії DVA, призначених для перетворення механічних коливань в

електричні сигнали, пропорційні віброприскоренню або середньоквадратичному значенню швидкості вібрації об'єкта.

Такий ВВП являє собою датчик з вбудованою схемою перетворення, до складу якого входить герметичний корпус, в якому знаходяться плати управління і мікроелектромеханічний датчик прискорення, що містить інерційну масу на пружній підвісці. Сили інерції, що діють на інерційну масу, врівноважуються силами пружності підвіски. Переміщення маси пропорційне величині діючого прискорення.

Величина переміщення контролюється датчиком місткості. У вихідний сигнал мікроелектромеханічного ВВП входить постійна складова, викликана гравітаційним полем Землі.

Зовнішній вид мікроелектромеханічного ВВП наведений на рис. 4.17.



Рисунок 4.17 - Мікроелектромеханічний ВВП DVA 132

Наприкінці слід зазначити, що серійно випускають більш п'єзоелектричних, менш - тензорезистивних, ще менш - ємнісних, індуктивних та електретних ВВП.

Індуктивні ВП - низькочастотні; тензорезистивні та ємнісні працюють у більш широкій області низьких та середніх частот, причому, з нульової частоти.

У області середніх та високих частот найбільш розповсюдженими є п'єзоелектричні ВП. Їх переваги - можливість одночасно виконувати функції механічного перетворювача.

4.2 Завдання до роботи

Варіант завдання задається викладачем для кожного студента індивідуально та складається з трьох цифр.

Варіанти завдань наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Варіанти завдання до індивідуальної (контрольної) роботи

	Перша цифра	Друга цифра	Третя цифра
	Тип ВВП	Тип ВВП	Номера питань
1	п'єзоелектричний, ємнісний	радіаційний	4.4.1, 4.4.6
2	електретний, тензометричний	мікроелектромеханічний	4.4.7, 4.4.8
3	п'єзоелектричний, індуктивний	радіаційний	4.4.3, 4.4.8
4	електретний, електродинамічний	мікроелектромеханічний	4.4.5, 4.4.9
5	п'єзоелектричний, електродинамічний	радіаційний	4.4.1, 4.4.9
6	електретний, ємнісний	мікроелектромеханічний	4.4.2, 4.4.10
7	п'єзоелектричний, тензометричний	радіаційний	4.4.3, 4.4.4
8	електретний, оптичний	мікроелектромеханічний	4.4.5, 4.4.7
9	п'єзоелектричний, електромагнітний	радіаційний	4.4.2, 4.4.6
0	електретний, індуктивний	мікроелектромеханічний	4.4.4, 4.4.10

Для кожного з типів ВВП, заданих за першою цифрою (табл. 4.1), вказати принцип дії, описати фізичні закони, що лежить в його основі, навести параметри, особливості використання, переваги та

недоліки. Привести два-три варіанти конструктивного виконання та дати їх порівняльну характеристику.

Для кожного з типів ВВП, заданих за другою цифрою (табл. 4.1), вказати принцип дії, описати фізичні закони, що лежить в його основі та привести варіанти конструктивного виконання (за можливістю).

Дати розгорнути письмові відповіді на контрольні запитання, задані за третьою цифрою (табл. 4.1).

Конструкції та характеристики деяких видів ВВП наведені у [28] - [31]. При виконання роботи, окрім вказаної літератури, можна користуватися будь-якими інтернет-ресурсами.

4.3 Порядок виконання роботи

4.3.1 Ознайомитися з класифікацією та основними параметрами ВВП.

4.3.2 Для ВВП за першою цифрою варіанту навести принцип дії, описати фізичний закон, що лежить в його основі, навести параметри, особливості використання, переваги та недоліки. Навести варіанти конструктивного виконання.

4.3.3 Для ВВП за другою цифрою варіанту навести принцип дії та описати фізичний закон, що лежить в його основі.

4.3.4 Дати відповіді на контрольні запитання.

4.4 Контрольні запитання

4.4.1 Класифікація ВВП.

4.4.2 Основні параметри ВВП.

4.4.3 Критерії оцінки безконтактних ВВП.

4.4.4 Особливості застосування інерційних ВВП.

4.4.5 Чуттєвість тензодатчиків та її залежність від матеріалу

4.4.6 Електретний ефект та його основні параметри.

4.4.7 Умови вимірювань за допомогою електретних ВВП.

4.4.8 П'єзоефект та його основні параметри.

4.4.9 Причини нерівномірності АЧХ п'єзоелектричних ВВП.

4.4.10 Умови створення оптимальної конструкції п'єзоелектричного ВВП.

ЛІТЕРАТУРА

1 ДСТУ 8216:2015 Вироби електронної техніки. Класифікація за умовами застосування та вимоги стійкості до зовнішніх впливових чинників.

2 Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення: ДСТУ 3021-95. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1995. – 70 с. – (Державний стандарт України).

3 ДСТУ 3011-95 Устаткування випробувальне кліматичне та механічне. Терміни та визначення.

4 ДСТУ 3380-96 Камери кліматично-механічних комплексних випробувань. Загальні технічні умови (замість ГОСТ 60460-97).

5 ДСТУ ІЕС 61587-1:2009 Конструкції механічні для електронного устаткування за ІЕС 60917 та ІЕС 60297. Частина 1. Кліматичні, механічні випробування, аспекти безпеки для шаф, стояків, каркасів і шасі (ІЕС 61587-1:2007, IDT).

6 ДСТУ ІЕС 61587-3:2008 Конструкції механічні для електронного устаткування за ІЕС 60917 та ІЕС 60297. Випробування. Частина 3. Визначення характеристик електромагнітного екранування шаф, стояків і каркасів (ІЕС 61587-3:2006, IDT).

7 ДСТУ 6098:2009 Методи випробування на стійкість до механічних зовнішніх чинників, що впливають на машини, прилади та інші технічні вироби. Випробування на вплив вібрації з відтворенням заданої акселепрограми процесу (ГОСТ 30630.1.8-2002 (МЭК 60068-2-57:1989), MOD; ІЕС 60068-2-57:1989, MOD).

8 ДСТУ 6099:2009 Методи випробування на стійкість до механічних зовнішніх чинників, що впливають на машини, прилади та інші технічні вироби. Випробування на вплив випадкової широкопasmової вібрації з використанням цифрової системи керування випробуванням (ГОСТ 30630.1.9-2002 (МЭК 60068-2-64:1993), MOD; ІЕС 60068-2-64:1993, MOD).

9 ГОСТ 11478-88 Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Технические требования и методы испытаний в части механических и климатических воздействий.

10 ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнение для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

11 ГОСТ 16019-2001. Аппаратура сухопутной подвижной радиосвязи. Требования по стойкости к воздействию механических и климатических факторов и методы испытаний.

12 ГОСТ 16962-71. Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний.

13 ГОСТ 20.57.406-81. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний.

14 ГОСТ 21552-84 Средства вычислительной техники. Общие технические требования, приемка, методы испытаний, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение.

15 Основи теорії випробувань. Конспект лекцій з дисципліни "Методи та засоби дослідження РЕЗ", частина 1 для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми «Радіoeлектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіoeлектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Шило Г.М., Поспеева І.Є. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2019. – 98 с.

16 Методики випробувань РЕЗ на зовнішні впливи. Конспект лекцій з дисципліни "Методи та засоби дослідження РЕЗ", частина 2 для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми «Радіoeлектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіoeлектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Шило Г.М., Поспеева І.Є. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2019. – 87 с.

17 Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Методи та засоби дослідження РЕЗ" для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми «Радіoeлектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіoeлектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Поспеева І.Є., Щурова Л.С. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2019. – 73 с.

18 Випробування приладів і систем. Види випробувань та сучасне обладнання: навчальний посібник / В. В. Аврутов, І. В. Аврутова, В. М. Попов ; НТУУ «КПІ». — Електронні текстові дані. — Київ : НТУУ «КПІ», 2009.

19 Голобородько М.Ю. Загальні вимоги до видів, послідовності та умов проведення випробувань радіоелектронного обладнання / М.Ю. Голобородько, І.Г. Зотова; О.С. Левшенко та інші. - // Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського. - 2018. - № 1, с. 86-92

20 В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. Контроль и испытания в проектировании и производстве РЭС. М.: Техносфера, 2005. – 504 с.

21 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.

22 Глудкин О.П.Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС. М.: Вища школа, 1991. - 336 с.

23 Никитин С.А., Бойко С.В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: Учебное пособие - 2-е изд. перераб. и доп. - Оренбург ГОУ ОГУ, 2004. - 462 с.

24 Карпушин В.Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре.- М.:Сов. Радио, 1971. - 344 с.

25 Карпушин В.Б. Виброшумы радиоаппаратуры. - М.: Сов. радио, 1977. - 320 с.

26 Испытательное оборудование. Каталог продукции SOVTEST. URL: <https://sovtest-ate.com/equipment/oborudovanie-dlya-mekhanicheskikh-ispytaniy/> (дата звернення 29.11.2019).

27 Каталог ВО УКРСПЕЦКОМПЛЕКТ. URL: http://ukrsk.com.ua/ustan_ispyit_vibr_elek.html (дата звернення 29.11.2019).

28 Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. URL: <https://works.doklad.ru/view/qFYKo9zlmBk.html> (дата звернення 29.11.2019).

29 Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т./Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). —М.: Машиностроение, 1981—Т. 5. Измерения и испытания. — Под ред. М. Д. Генкина. 1981. - 496 с. URL:

http://scask.ru/k_book_vb5.php?id=63, стор. 196 – 210 (дата звернення 29.11.2019).

30 Преобразователи виброизмерительные. URL: <http://standart-m.com.ua/izmeritelnye-pribory/shumomery/preobrazovateli-vibroizmeritelnie> (дата звернення 29.11.2019).

31 Оптический преобразователь и способ его установки. URL: <http://patents.su/4-1415070-opticheskijj-vibropreobrazovatel-i-sposob-ego-ustanovki.html> (дата звернення 29.11.2019).

32 Датчики виброускорения. URL: <http://ukrsk.com.ua/index.php?cat=520> (дата звернення 29.11.2019).