

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет "Запорізька політехніка"

ОСНОВИ ТЕОРІЇ ВИПРОБУВАНЬ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни
“Методи та засоби дослідження РЕЗ”,
частина 1

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

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., Поспеєва І.Є. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2019. – 98 с.

Укладачі: Шило Галина Миколаївна, доктор техн. наук,
доцент, зав. каф. ІТЕЗ,
Поспеєва Ірина Євгенівна, ст. викладач.

Рецензент: Бугрова Тетяна Іванівна, канд. техн. наук,
доцент каф. РТТ

Відповідальний за випуск: Шило Галина Миколаївна, канд.
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.....	5
1 ПОНЯТТЯ ЯКОСТІ ТА ЗАСОБИ ЇЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ. ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЯКІСТЬ РЕЗ.....	6
1.1 Поняття якості продукції. Роль випробувань і контролю у підвищенні якості.....	6
1.2 Роль стандартизації та сертифікації у підвищенні якості РЕЗ.....	9
1.3 Фактори, що визначають якість РЕЗ	10
1.3.1 Внутрішні фактори	10
1.3.2 Зовнішні фактори.....	11
1.3.3 Механічні ЗВФ.....	13
1.3.4 Кліматичні та термічні ЗВФ.....	13
1.3.5 Біологічні ЗВФ	14
1.3.6 Інші види ЗВФ.....	14
1.3.7 Вплив ЗВФ на РЕЗ	15
2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ ВИПРОБУВАНЬ. КЛАСИФІКАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ.....	18
2.1 Основні поняття. Цілі та завдання випробувань	18
2.2 Класифікація видів, методів і технологій випробувань.....	20
2.2.1 Класифікація випробувань за умовами та місцем, проведення.....	20
2.2.2 Класифікація випробувань за видом дії.....	25
2.2.3 Класифікація випробувань за програмними цілями і призначенням	27
2.2.4 Класифікація випробувань на етапі проектування	28
2.2.5 Класифікація випробувань готової продукції.....	28
2.2.6 Класифікація випробувань за тривалістю проведення.....	29
2.2.7 Класифікація випробувань за результатом дії на стан виробу	30
2.2.8 Класифікація випробувань за характеристикою об'єкта, що визначається	30
3 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ	33
3.1 Загальні принципи проведення випробувань РЕЗ.....	33
3.2 Програма випробувань	37
3.2.1 Розділ 1. Об'єкт випробувань.....	38
3.2.2 Розділ 2. Мета випробувань	40

3.2.3 Розділ 3. Обґрунтування необхідності проведення випробувань.....	41
3.2.4 Розділ 4. Місце проведення та забезпечення випробувань.....	41
3.2.5 Розділ 5. Обсяг і методика випробувань.....	42
3.2.6 Розділ 6. Оформлення результатів випробувань.....	44
3.2.7 Загальні вимоги до ПВ	44
3.3 Методика випробувань	46
3.4 Загальна структура і методичні принципи проведення випробувань на механічні впливи	52
3.4.1 Структура методики випробувань на механічні впливи	54
3.4.2 Вимоги до обладнання для механічних випробувань	56
3.4.3 Проведення випробувань	57
3.5 Загальна структура і методичні принципи проведення випробувань на кліматичні впливи	57
3.5.1 Попередня витримка.....	58
3.5.2 Установка виробів у камери кліматичних випробувань	58
3.5.3 Особливості проведення випробувань на кліматичні впливи на різних стадіях проектування. Нормалізована послідовність кліматичних випробувань	60
4 ВІБРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ВВП).....	61
4.1 Класифікація віброперетворювачів	61
4.2 Основні параметри віброперетворювачів	63
4.3 Критерії оцінки безконтактних ВВП.....	64
4.4 Особливості застосування інерційних ВВП	67
4.5 Конструкції та особливості роботи ВВП різного принципу дії.....	70
4.5.1 Ємнісні ВВП.....	71
4.5.2 Індуктивні та електромагнітні ВВП	72
4.5.3 Тензометричні ВВП	74
4.5.4 Електродинамічні ВВП	78
4.5.5 Електретні ВВП.....	80
4.5.6 П'єзоелектричні ВВП - принцип дії та особливості роботи.....	84
4.5.7 П'єзоелектричні ВВП - особливості конструкції	90
4.5.8 Інші види ВВП	94
ЛІТЕРАТУРА.....	97

ВСТУП

Якість радіоелектронних засобів (РЕЗ), як сукупність властивостей, що визначають здатність виробів задовольняти заданим вимогам споживача, закладається в процесі розробки і виготовлення продукції, а об'єктивно оцінюється в процесі експлуатації.

Однак інформації, що при цьому отримується, по-перше, недостатньо, оскільки не всі параметри РЕЗ вимірюються в умовах експлуатації, а по-друге, вона запізнена, оскільки на виготовлення РЕЗ вже витрачені великі кошти. Ця проблема посилюється в міру подальшої мікромініатюризації РЕЗ, коли цілі блоки виконуються у вигляді інтегральних мікросхем, які є неремонтоздатними.

Одним з методів оцінки якості служать теоретичні розрахунки. Однак розрахункові оцінки потребують експериментального підтвердження, оскільки вихідні дані і моделі є наближеними. З розвитком мікромініатюризації і ускладненням РЕЗ створення адекватних моделей стає проблематичним.

У зв'язку з цим істотний обсяг інформації про якість РЕЗ отримують шляхом контролю їх параметрів і проведення випробувань на всіх етапах, починаючи з розробки нормативно-технічної документації і закінчуючи аналізом реклаमाцій і висновків споживача про якість готових виробів.

Випробування РЕЗ є одним з елементів процесу контролю з метою визначення технічних показників апаратури (приладів) за допомогою різних засобів. До цих показників відносяться різні технічні параметри, надійність, безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збереженість і ін.

Під випробуванням РЕЗ розуміється комплекс контрольно-перевірочних робіт, пов'язаних з виявленням окремих характеристик випробовуваної апаратури, її вузлів і блоків, який включає перевірку відповідності РЕЗ технічним завданням і конструкторській документації, працездатності апаратури при впливі на неї граничних механічних і кліматичних факторів, випробування на електромагнітну сумісність і ін.

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

1 ПОНЯТТЯ ЯКОСТІ ТА ЗАСОБИ ЇЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ. ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЯКІСТЬ РЕЗ

1.1 Поняття якості продукції. Роль випробувань і контролю у підвищенні якості

Якість продукції - сукупність властивостей, що обумовлюють її придатність задовольняти певні потреби відповідно до її призначення.

Зростаюче значення проблем якості радіоелектронних засобів (РЕЗ), що спостерігається останнім часом, багато в чому обумовлено різким ускладненням радіоелектронних засобів та їх широким впровадженням в усі сфери наукових досліджень, виробництва і управління, не кажучи вже про спеціальні області їх застосування.

Підвищення якості РЕЗ стало одним з головних шляхів поліпшення якості виробів машино- і приладобудування, підвищення експлуатаційної надійності і якості праці операторів в різних системах управління, а, отже, підвищення продуктивності праці та ефективності в різних сферах науки, управління і виробництва.

Проблеми якості РЕЗ повинні вирішуватися вже на самих ранніх стадіях і етапах проектування і розробок технологічних процесів. Але наявність у РЕЗ сукупності технологічних властивостей ще не характеризує їх якість. Важливо кількісно оцінити властивості радіоелектронних виробів, з яких складається ця якість.

Якість сучасних РЕЗ є комплексним показником, що залежить від загального наукового рівня розвитку розробок, якості виробів електронної техніки, досконалості технології і метрологічного забезпечення виробництва.

Задача підвищення якості нерозривно пов'язана з удосконаленням системи організаційно-технічних, конструкторсько-технологічних та експлуатаційних робіт, спрямованих на поліпшення тактико-технічних параметрів радіоелектронних засобів, зростання їх експлуатаційної надійності, поліпшення зручності в експлуатації, зовнішнього вигляду і т.п.

Серед вимог до якості РЕЗ зазвичай прийнято називати технічні (функціональні) і економічні показники, надійність, рівень

уніфікації. Це дійсно важливі показники, однак всі ці показники можна розглядати лише як частину складної системи споживчих властивостей сучасних виробів РЕЗ, серед яких особливе місце займають естетичні та ергономічні показники, з якими безпосередньо працює оператор.

Аналіз ситуації, що склалася на підприємствах, які розробляють радіоелектронну продукцію, і в багатьох сферах застосування і тривалої експлуатації РЕЗ показує, що успішне вирішення проблеми забезпечення високої якості виробів неможливе шляхом проведення розрізнених локальних заходів, концентруючи увагу тільки на якійсь одній стадії забезпечення якості виробів і тим більше на окремо взятих показниках якості, нехай навіть і найбільш значущих і важливих.

Необхідно розуміти і те, що якість РЕЗ, в свою чергу, залежить від якості сировини, якості конструкційних та оздоблювальних матеріалів, якості комплектуючих і кабельних виробів, впровадження високих наукоємних технологій та наукових методів організації виробництва і т.п.

Таким чином, при визначенні якості радіоелектронної апаратури необхідно розглядати єдиний комплекс технічних, соціально-економічних і споживчих (ергономічних і естетичних) вимог. Безумовно, вагомість тих чи інших вимог в цьому комплексі змінюється в залежності від того, якість яких виробів розглядається. Для одних вирішальне значення гратимуть такі технічні характеристики, як надійність, довговічність і т.п., для інших поряд з технічними параметрами починають відігравати суттєву роль ергономічні і економічні показники.

Методи оцінки технічних і технологічних показників якості радіоелектронних виробів досить добре вивчені і широко застосовуються в практиці проектування і виробництва. Вони можуть бути досить повно і об'єктивно оцінені при прийнятно-здавальних, періодичних, типових випробуваннях, випробуваннях на надійність і т.п. Можуть вони бути оцінені і за більш тривалий період експлуатації РЕЗ шляхом статистичного аналізу даних від споживача.

Таким чином, можна сказати, що якість сучасних РЕЗ у вирішальній мірі залежить від правильної постановки, організації, методики і технології контролю, вимірювань і випробувань, які виконуються на всіх етапах комплексного

процесу проектування і виробництва, і в цілому від рівня метрологічного забезпечення виробництва.

Важливість випробувань, вимірювань і контролю якості обумовлюється тим, що сучасні РЕЗ представляють собою складні багатофункціональні вироби, які містять величезну кількість виробів електронної, микро- і нанотехніки, пристроїв точної механіки, мікроелектромеханіки і приладобудування, систем і пристроїв відображення інформації та управління і т.п., зібраних в складних компонувальних складальних одиницях, об'єднаних внутрішньоблочним і міжблочним монтажем і повинних з високою точністю, якістю та надійністю виконувати функції прийому, переробки та передачі інформації, часом в умовах коригувань, координації та переміщення в просторі, а також забезпечувати в цілому комплексну надійність РЕЗ.

Аналіз оснащеності випробувальних підрозділів підприємств галузі свідчить про те, що основна частка (понад 90%) випробувального устаткування використовується більше 10 років і вже давно морально застаріло. Крім того, практично немає засобів автоматизації випробувань і вимірювань, відсутні кваліфіковані кадри. Обладнанням, яке відповідає сучасним вимогам, оснащені лише одиниці підприємств.

Процес вимірювань, контролю та випробувань РЕЗ ускладнюється ще й тим, що проектування і виробництво радіоелектронної техніки проводиться в умовах все більш широкій мікромініатюризації рішень і має справу з елементами мікронних і субмікронних розмірів. У виробництві застосовуються новітні, особливо чисті матеріали і високі наукомісткі технології із застосуванням прецизійного спеціального технологічного обладнання і апаратури, завдяки чому контроль параметрів таких технологічних процесів виливається в складну інженерну задачу.

Тому процес підвищення якості конструкцій РЕЗ обумовлюється насамперед такими заводськими факторами, як модернізація існуючого та створення нового інструменту, технологічне оснащення, загальнозаводське і спеціальне технологічне обладнання та матеріали, організаційне, структурне поліпшення всіх ланок технологічного процесу, перехід до більш високого рівня автоматизації виробництва і т.п.

Важливе значення для якості радіоелектронних виробів мають їх правильна експлуатація, рівень стандартизації і уніфікації, економічні фактори і т.п.

1.2 Роль стандартизації та сертифікації у підвищенні якості РЕЗ

Найважливіша роль в підвищенні якості об'єктів радіоелектронної галузі належить стандартизації і сертифікації.

Стандартизація дозволяє забезпечувати стабільний рівень якості РЕЗ, дає можливість керувати ним вже з перших етапів проектування, а **сертифікація** - контролювати рівень якості продукції, сприяти довірі споживача до постачальника, підвищувати конкурентоспроможність виробів.

Незважаючи на те, що існуючий на сьогоднішній день фонд нормативної документації з радіоелектронної галузі налічує декілька тисяч одиниць (державні та галузеві стандарти, керівні документи і т.ін.), більшість з них морально застаріли, не відповідають сучасним вимогам ринку і потребують ретельного перегляду і актуалізації. Тому необхідна розробка нового фонду нормативної документації, яка враховує специфіку радіоелектронного комплексу та відповідає передовим міжнародним тенденціям розвитку радіоелектроніки.

Радіоелектронні засоби високої надійності, що випускаються на атестованому виробництві, сертифікуються органом з сертифікації після надання в цей орган доказової документації, до якої відносяться:

- результати сертифікаційних випробувань;
- аналіз статистичних даних про якість і надійність РЕЗ;
- сертифікат на систему якості при виробництві РЕЗ;
- аналіз результатів виробництва РЕЗ, її відмов в процесі виробництва, заходів щодо усунення причин відмов і їх ефективності.

РЕЗ, які не мають індексу високої надійності, при необхідності піддаються сертифікаційним випробуванням в обсягах, що гарантують придатність випробуваної партії даного виробу.

Відносно поставок комплектуючих виробів електронної техніки зарубіжного виробництва слід зазначити, що вони здійснюються численними дилерами, які, як правило, не мають офіційної акредитації на даний вид діяльності, а якість продукції не

підтверджується відповідними сертифікатами. Одним із шляхів, що забезпечують постачання високоякісних комплектуючих виробів РЕЗ, може бути їх сертифікація за правилами і процедурами національних регламентів і стандартів.

Сертифікація, як правило, пов'язана з проведенням комплексу випробувань і контролю якості продукції із застосуванням сучасного випробувального обладнання. З урахуванням зазначених проблем сертифікацію продукції, що поставляється, здійснюють в спеціалізованих випробувальних центрах.

1.3 Фактори, що визначають якість РЕЗ

Усі фактори, що діють на РЕЗ, підрозділяються на *зовнішні і внутрішні*.

До *зовнішніх факторів* відносять дію навколишнього середовища і особливості експлуатації, пов'язані з місцем установки виробу та умовами його транспортування. Певні зовнішні впливи можуть викликати обмеження або втрату працездатності виробу або його складових частин в процесі експлуатації.

Внутрішніми факторами для об'єктів техніки є процеси старіння і зношування.

1.3.1 Внутрішні фактори

Процеси *старіння* відбуваються безперервно, як під час роботи, так і під час зберігання і транспортування виробів.

Зношування проявляється в основному в процесі експлуатації і залежить від впливу зовнішніх факторів, від режимів експлуатації та роботи виробів.

Ймовірність впливу внутрішніх факторів зростає при збільшенні тривалості експлуатації і при порушенні режимів роботи, які можуть характеризуватися: частотою включень і перемикань, що викликає у виробках перехідні процеси; перенапруженнями; поштовхами та ін. Часті включення і перемикання деяких виробів можуть також впливати на механічне зношування їх конструктивних елементів. У виробках, призначених для циклічних режимів роботи, співвідношення тривалості роботи і перерв істотно впливають на теплові режими. Дія внутрішніх факторів у багатьох випадках залежить від схем і конструкцій виробів.

За часом і характером впливу режими експлуатації і роботи виробів можуть бути:

- безперервними;
- періодичними (циклічними);
- аперіодичними (одноразовими);
- повторно - переривчастими;
- випадковими.

1.3.2 Зовнішні фактори

Відповідні стандарти ділять усі зовнішні впливові фактори (ЗВФ) на наступні класи: механічні, кліматичні, біологічні, радіаційні, електромагнітні, спеціальних середовищ і термічні.

У свою чергу кожен клас поділяється на групи, а кожна група на види, яким відповідають певні види випробувань. Наприклад, клас кліматичних впливів ділиться на групи: атмосферний тиск, температура середовища, вологість повітря або інших газів та ін.

Групи в свою чергу поділяються на такі види: атмосферний підвищений або понижений тиск, підвищена і, відповідно, знижена температура середовища, зміна температури середовища та ін.

Для механічних ЗВФ вводиться ще одна градація - підгрупа.

Одна з можливих класифікацій ЗВФ приведена на рисунку 1.1.

Деякі види, групи та класи впливів визначаються призначенням виробів та їх взаємодією з середовищами, які створюються людиною в процесі його діяльності. До таких класів відносяться класи ЗВФ:

- спеціальних середовищ;
- радіаційні;
- електромагнітні;
- термічні.

Освоєння космосу призвело до необхідності виділення ще одного класу (не передбаченого стандартами), в який увійшли всі види так званих космічних впливів.

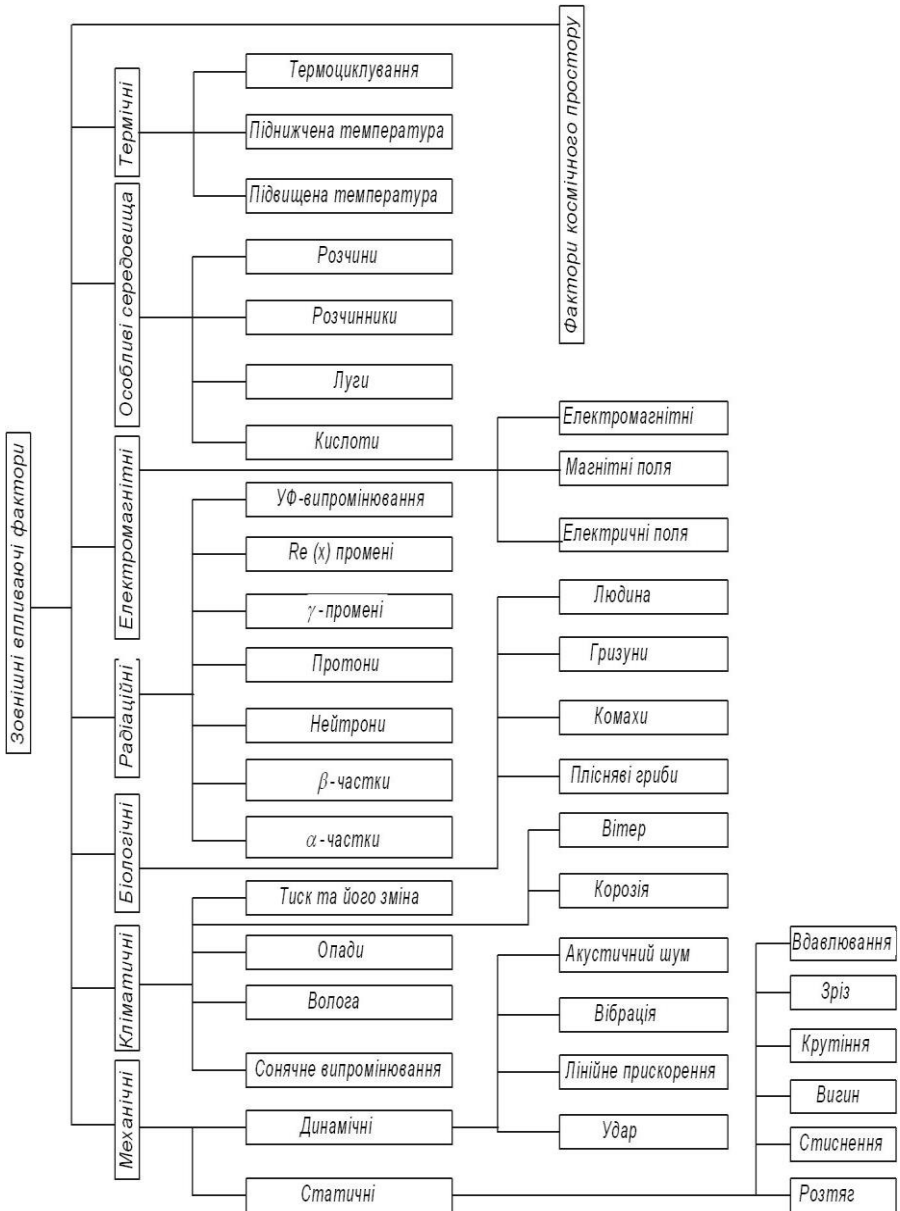


Рисунок 1.1 - Класифікація ЗВФ

1.3.3 Механічні ЗВФ

Як випливає з класифікації, до механічних факторів відносять дві групи: *фактори статичного впливу* і *фактори динамічного впливу*.

До механічних *факторів статичного впливу* відносяться такі види:

- розтяг;
- стиснення;
- вигин;
- кручення;
- зріз;
- вдавнення.

До механічних *факторів динамічного впливу* відносяться такі види як:

- удар;
- прискорення - лінійні або кутові, - що викликають перевантаження або стан повної або часткової невагомості;
- вібраційні впливи;
- акустичний шум.

1.3.4 Кліматичні та термічні ЗВФ

Серед *кліматичних факторів* зазвичай виділяють впливи:

- сонячного випромінювання (в приповерхневих шарах атмосфери);
- вологи, що міститься в повітрі або будь-який інший суміші газів (під вологою розуміють пари будь-якої рідини);
- опадів, до яких зазвичай відносять - дощ, паморозь, сніг, лід та ін.;
- атмосфери (газовий склад, наявність домішок у вигляді рідких і твердих аерозолів, частинок пилу, піску);
- тиску аеростатичного або гідростатичного (нормального, підвищеного, зниженого), його змін або перепадів;

До кліматичних факторів також відносять такий фактор, як вплив руху середовища, тобто вітер, хвильовий рух рідини та ін.

Термічні впливи в деяких випадках розглядаються як частина кліматичних впливів, а в інших виділяються в окремий клас. До них

відносять вплив підвищеної, зниженої температури, її періодичні (термоцикування) і неперіодичні зміни.

1.3.5 Біологічні ЗВФ

Серед *біологічних факторів* зазвичай виділяють вплив на технічні системи:

- цвілевих грибів та інших мікроорганізмів;
- комах;
- гризунів.

Іноді у вигляді біологічного фактору впливу зовнішнього середовища можуть виступати і плазуни або вищі тварини, але ймовірність такої ситуації набагато нижче, ніж для гризунів.

Це призводить до необхідності включення в цей клас ЗВФ і вплив людини, яка за своєю руйнівністю і масштабами може перевершити вплив інших біологічних факторів.

1.3.6 Інші види ЗВФ

До радіаційних факторів відносять сукупність іонізуючих випромінювань, з якими технічна система може зіткнутися при своїй нормальній експлуатації. Це потоки α - і β - частинок, протонів і нейтронів; γ - Ре- і УФ випромінювання. Необхідно відзначити, що фактори цього класу здебільшого мають техногенне походження.

Це ж, в основному, можна сказати і про такий клас факторів, як вплив спеціальних середовищ. Мається на увазі вплив, в основному хімічний, тобто кислот, лугів, розчинників і розчинів хімічно активних речовин.

До ЗВФ космічного простору в районі Землі або аналогічного космічного тіла можна віднести вплив:

- вакууму;
- власної зовнішньої атмосфери космічного апарату;
- атмосфери планети (склад і температура атмосфери);
- потоків нейтральних частинок в залежності від їх складу і швидкості;
- потоків заряджених частинок, що генеруються в атмосфері планети;
- «сонячного вітру»;
- сонячного космічного випромінювання;
- електромагнітного випромінювання Сонця;

- відбитого планетою сонячного випромінювання;
- власного теплового випромінювання планети;
- галактичних космічних випромінювань;
- потоків міжпланетного пилу і метеорних частинок;
- магнітного поля планети;
- замороженого магнітного поля «сонячного вітру».

Необхідно зауважити, що іноді одночасна дія декількох факторів класифікується як незалежний фактор. Так, одночасний вплив вібрації і ударного навантаження класифікується як тряска - ще один вид механічного навантаження технічних об'єктів.

1.3.7 Вплив ЗВФ на РЕЗ

Зовнішні і внутрішні фактори перш за все оказують впливи на *матеріали виробів*. Дія цих впливів проявляється, в основному, шляхом наступних механізмів:

- адсорбційного;
- дифузійного;
- хімічного;
- корозійного;
- радіаційного.

Фізико-хімічні процеси, що виникають в матеріалах, можуть відбуватися у об'ємі і на поверхні виробів, в електричних ланцюгах, в рухомих і нерухомих з'єднаннях. Причиною, яка призводить до появи зазначених процесів, є вплив зовнішньої енергії, що перетворюється при цьому з одного виду в інший. Найчастіше на вироби впливають такі види енергії:

- теплова;
- електрична;
- електромагнітна;
- механічна;
- хімічна.

Кожному виду енергії відповідає певний характер взаємодії між частинками в відповідних енергетичних полях.

Під дією енергії одного або декількох видів у виробках виникають фізико-хімічні процеси, які призводять до зміни значень параметрів і характеристик матеріалів і виробів, та в ряді випадків викликають відмови.

Найбільш поширені причини виникнення відмов:

- теплове руйнування (втрата теплової стійкості, перегорання, розплавлення та ін.);
- деформація і механічне пошкодження, включаючи порушення контактів, обриви і короткі замикання, порушення механічних фіксацій та ін.;
- електричне руйнування (пробій, порушення електричної міцності та ін.);
- електрохімічна корозія;
- радіаційне руйнування;
- зношування виробів;
- забруднення поверхонь деталей і виробів (порушення контактів, зміна фотометричних характеристик, погіршення зорового сприйняття інформації та ін.).

Можливі зміни *незворотні і зворотні*.

Прикладами *незворотних змін* є корозія металів, зміна структури матеріалів при інтенсивному радіоактивному опроміненні та ін.

До *зворотніх змін* відносяться такі, як відновлення властивостей матеріалу, що адсорбував гази або вологу своєю поверхнею; відновлення властивостей, значень параметрів і характеристик виробів після припинення температурних впливів та ін.

Слід зазначити, що одночасна дія декількох ЗВФ може як підсилювати, так і зменшувати їх сумісний вплив. У табл. 1.1 наведені деякі можливі наслідки одночасного впливу найбільш розповсюджених ЗВФ.

Таким чином, виникнення відмов можна уявити як тимчасовий кінетичний процес, який залежить від змін структури і властивостей матеріалів, з яких виготовлено виріб.

Одним із шляхів підвищення якості виробів можна вважати вивчення фізико-хімічних процесів в матеріалах, елементах і готових виробах, що відбуваються на стадії експлуатації, з метою їх врахування на стадіях розробки та виробництва.

Особливого значення набувають знання зазначених процесів для правильної організації випробувань і аналізу їх результатів.

Таблиця 1.1 - Можливі наслідки одночасного впливу найбільш розповсюджених ЗВФ

ЗВФ, що впливають одночасно	Можливі наслідки впливу
Підвищена температура та: підвищена вологість, сонячна радіація, низький атмосферний тиск, соляний туман, вібрація, звуковий тиск, удар, іонізовані гази. Знижена температура та: підвищена вологість, вібрація, удар. Підвищена вологість та: низький атмосферний тиск, забруднення повітря. Туман та забруднення повітря. Сонячна радіація та: вітер, соляний туман, вібрація, іонізовані гази. Вітер та соляний туман. Удар та звуковий тиск.	Механічне зношення
Туман та дощ.	Погіршення працездатності
Знижена температура та вітер. Дощ та вітер. Вітер, пил та пісок.	Механічне зношення та погіршення працездатності
Підвищена вологість, дощ та туман. Грибоутворення та: підвищена температура, підвищена вологість, дощ, соляний туман. Забруднення повітря та: дощ, вітер. Низький атмосферний тиск та іонізовані гази. Космічна та сонячна радіація.	Взаємне підсилення дії
Підвищена температура, туман, пил, пісок. Знижена температура та: дощ, сонячна радіація, грибоутворення, пил, пісок, соляний туман, звуковий тиск, іонізовані гази. Підвищена вологість та: сонячна радіація. пил, пісок, вібрація. Дощ та соляний туман. Сонячна радіація та: грибоутворення, пил, пісок, низький атмосферний тиск. Грибоутворення та іонізовані гази. Низький атмосферний тиск, вібрації, удари. Вітер та звуковий тиск.	Взаємне послаблення дії

2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ ВИПРОБУВАНЬ. КЛАСИФІКАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ

2.1 Основні поняття. Цілі та завдання випробувань

Випробування - експериментальне визначення кількісних і якісних характеристик параметрів виробу шляхом впливу на нього або його модель спланованого комплексу зовнішніх впливаючих факторів (ЗВФ).

Інформація, що отримана під час випробувань, є важливою експериментальною основою функціонування систем управління якістю, розглянутих у розділі 1.

При проведенні випробувань вводиться таке поняття, як ступінь жорсткості.

Ступінь жорсткості випробувань - умовний номер, що відображає інтенсивність дії фактора, який впливає на об'єкт, з параметрами, регламентованими в нормативній документації.

Ступені жорсткості зазвичай позначаються арабськими або римськими цифрами (наприклад, I, IV, XII і т.ін.).

Основними цілями випробувань РЕЗ є:

2.1.1 Експериментальне підтвердження теоретичних розрахунків, прийняття припущень і гіпотез, заданих показників якості РЕЗ в умовах, близьких до експлуатаційних, а також отримання оцінок, що дозволяють визначити резерви підвищення якості конструкторсько-технологічних рішень і резерви надійності розроблених виробів.

2.1.2 Контроль якості технології та організації виробництва, дотримання у виробництві та експлуатації вимог технічної і технологічної документації.

2.1.3 Усунення дефектів взаємодії виробів в складі комплексів (систем) РЕЗ.

Виділяють три групи завдань, що вирішуються в ході проведення випробувань:

- отримання емпіричних даних, необхідних для проектування РЕЗ;

- встановлення відповідності виробу тактико-технічним вимогам;

- визначення граничних станів РЕЗ в процесі експлуатації.

Цілі випробувань не постійні, вони можуть змінюватися на різних етапах проектування, виробництва і експлуатації.

Таким чином, проведення випробувань спрямоване на виявлення:

- недоліків конструкції і технології виготовлення РЕЗ, які не дозволяють виробу якісно і надійно виконувати цільові функції в умовах експлуатації;

- відхилень від конструкції або технології, допущених виробництвом;

- прихованих випадкових дефектів матеріалів та комплектуючих виробів, що не піддаються виявленню при існуючих методах технічного контролю;

- резервів підвищення якості та надійності конструктивно-технологічного рішення виробу.

Результати випробувань, а саме кількісні показники рівня якості та надійності виробів, використовуються при розробці РЕЗ, в яких ці вироби будуть функціонувати. Одночасно розробники РЕЗ за результатами випробувань виробів у виробництві виявляють відхилення від конструкторської або технологічної документації, допущені в процесі виробництва, встановлюють причини зниження необхідного рівня якості і т.п. Якщо причина зниження якості не встановлена, вживаються необхідні заходи щодо вдосконалення засобів і методів технічного контролю продукції або в цілому технологічного процесу.

Для підвищення якості та надійності виробів у процесі виробництва розробляють спеціальні види і методи випробувань, які забезпечують виявлення виробів з прихованими дефектами, що викликають появу ранніх відмов у РЕЗ. Такі випробування називаються тренуваннями (термострумове тренування, електротренування, тренування термоциклів і т. ін.). Режими тренувань вибирають такими, щоб вони не витрачали ресурсів зразків, які не містять дефектів, щоб не викликати їх відмови при експлуатації.

Зазначені цілі і завдання випробувань є загальними для будь-якого виду РЕЗ. У той же час програми і методи проведення випробувань визначаються конкретним видом виробу, його цільовим призначенням, умовами експлуатації.

2.2 Класифікація видів, методів і технологій випробувань

Види випробувань, їх обсяг, програма випробувань і зміст у першу чергу залежать від цілей випробувань і типу виробництва.

Існує ряд національних та міжнародних стандартів, що встановлюють правила і методи випробувань. Стандартні умови забезпечують ідентичність випробувань, необхідну точність вимірювань, порівнянність результатів і вибір засобів вимірювань.

Класифікаційне угруповання випробувань за певними ознаками є видом випробувань.

Класифікація випробувань згідно державного стандарту «ДСТУ 3021-95 Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення» [2] надана на рис. 2.1. Вид випробувань, що характеризується організаційною ознакою їх проведення та прийняттям рішень за результатами оцінки обладнання в цілому, є категорією випробувань. На рис. 2.1 представлені 9 категорій випробувань; кожна категорія характеризує випробування за певними ознаками їх проведення.

2.2.1 Класифікація випробувань за умовами та місцем, проведення

У стандарті [9] охарактеризовано 62 види випробувань.

Зазначено, що усі застосовувані методи випробувань електронного обладнання класифікуються на дві групи:

- фізичні (натурні) випробування РЕЗ (або їх дослідних і макетних зразків);
- випробування з використанням моделей РЕЗ.

Фізичні випробування можуть проводитися як при впливі зовнішніх факторів, що створюються штучним шляхом в лабораторних умовах із застосуванням спеціальних випробувальних стендів і спеціального випробувального устаткування, так і при впливі природних зовнішніх факторів.

Склад і сутність фізичних випробувань наведено у табл. 2.1.

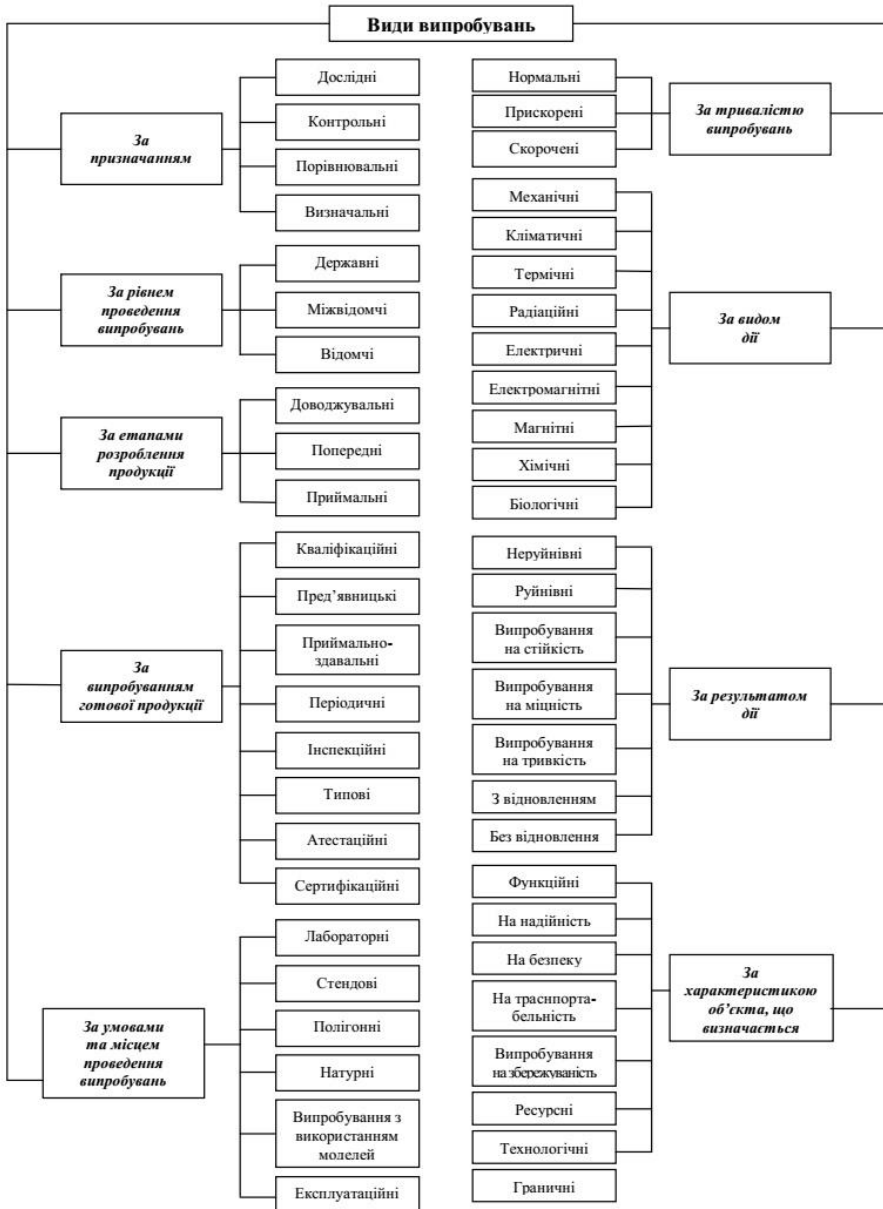


Рисунок 2.1 - Класифікація випробувань

Таблиця 2.1 - Класифікація фізичних випробувань

Найменування випробувань	Призначення випробувань
полігонні	Випробування, що проводяться на випробувальному полігоні. Широко поширені полігонні випробування виробів, які проводяться при впливі зовнішніх кліматичних факторів. При цьому випробування виробів, призначених для експлуатації та зберігання тільки в обмежених кліматичних районах, проводять на полігонах, розташованих у пунктах, що характеризують кліматичний вплив цих районів.
натурні	Випробування в умовах, які відповідають умовам його використання згідно з прямим призначенням із безпосереднім оцінюванням чи контролем визначуваних характеристик властивостей об'єкта. Натурні випробування об'єкта реалізуються при виконанні трьох основних умов: • випробуванням підлягає безпосередньо виготовлений виріб без застосування моделей або складових частин апаратури; • випробування проводяться в умовах і при впливах на вироби факторів, відповідних до умов і впливів при їх використанні за цільовим призначенням; • характеристики об'єкта випробувань вимірюються безпосередньо без використання аналітичних залежностей, що відображують фізичну структуру об'єкта випробувань і його складових частин (при цьому допускається застосування математичного апарату для статистичної обробки експериментальних даних).
стендові	Випробування об'єкта, що проводяться на випробувальному обладнанні.
лабораторні	Випробування об'єкта, що проводяться в лабораторних умовах.
швартові та ходові	Випробування для морської техніки.
наземні та польотні	Випробування для морської техніки.

Полігонні випробування проводять на спеціально обладнаних полігонах. Широко поширені полігонні випробування РЕЗ, призначених для експлуатації та зберігання тільки в певних кліматичних районах - їх проводять на полігонах, розташованих в пунктах, що мають характерні кліматичні параметри зовнішнього середовища.

Натурні випробування - випробування РЕЗ в умовах, що відповідають умовам їх використання за прямим призначенням з безпосередньою оцінкою або контролем певних тактико-технічних характеристик РЕЗ.

Мета полігонних і натурних випробувань - дослідження комплексного впливу реальних природних кліматичних, механічних і інших факторів, що впливають на зміну параметрів РЕЗ та викликають їх зворотні та незворотні відмови при експлуатації, тривалій консервації і зберіганні. Ці випробування забезпечують отримання повної і достовірної інформації про комплексний вплив факторів навколишнього середовища на параметри РЕЗ.

За результатами полігонних і натурних випробувань розробляються рекомендації щодо способів захисту РЕЗ від впливу зовнішніх факторів.

Лабораторні та стендові випробування відрізняються від випробувань в умовах реальної експлуатації тим, що при їх проведенні не представляється можливим моделювати всі зовнішні впливи одночасно в тій же сукупності, яка має місце при реальній експлуатації.

Зазвичай при лабораторних та стендових випробуваннях РЕЗ піддаються впливу одного або декількох певних кліматичних, механічних або інших чинників.

До фізичних випробувань слід віднести також **експлуатаційні випробування**, тобто випробування об'єкта, що проводяться безпосередньо в умовах експлуатації. Одним з основних видів експлуатаційних випробувань є дослідна експлуатація РЕЗ. Іноді проводиться підконтрольна експлуатація, яка умовно може бути віднесена до експлуатаційних випробувань.

Випробування з використанням моделей здійснюються методами методами фізичного, математичного моделювання та статистичних випробувань. Застосування цих методів дозволяє

відмовитися від ряду складних фізичних випробувань реальних виробів або їх макетів.

Фізичне моделювання полягає в тому, що первинний параметр об'єкта випробувань (процес в елементі схеми або будь-який зовнішній вплив) замінюється простою фізичною моделлю, що здатна імітувати зміни цього параметра.

Фізичне моделювання може здійснюватись також наступними статистичними методами випробувань.

Метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло) полягає в тому, що за допомогою багаторазових випадкових випробувань (обчислень, зроблених над випадковими числами) визначають ймовірність появи деякої випадкової події (математичного очікування випадкової величини).

Цей метод дозволяє визначити характеристики надійності, виходячи із припущення, що відомий механізм відмов при різних комбінаціях значень параметрів виробів, обраних випадковим чином відповідно заданій статистичній моделі.

Математичне моделювання базується на використанні рівнянь, що зв'язують вхідні та вихідні параметри об'єкта випробувань. Ці рівняння виводять на підставі вивчення конкретних виробів і їх внутрішніх функціональних зв'язків, після чого здійснюють математичний опис установлених зв'язків з урахуванням впливу різних факторів на виробу.

Основний недолік методу – необхідність проведення великого обсягу теоретичних і експериментальних досліджень для визначення співвідношень, що характеризують математичну модель об'єкта, знання ймовірнісних характеристик первинних (вхідних) параметрів. Необхідність проведення великого обсягу експериментальних досліджень, технічна складність виконання фізичних моделей цілого ряду пристроїв, висока вартість і тривалість проведення випробувань не сприяють широкому застосуванню методів фізичного та математичного моделювання у практиці випробувань.

Метод статистичних випробувань об'єкта передбачає проведення випробувань на реальних об'єктах або їх електронних моделях.

При випробуваннях на реальних об'єктах проводять дослідження можливих причин виникнення відмов виробів і їх наслідків шляхом штучного введення в схему обривів, коротких

замикань або установки комплектуючих елементів із параметрами, що виходять за припустимі норми.

Проведення випробувань на електронних моделях об'єкта полягає в тому, що певні комплектуючі елементи схеми замінюються фізичними моделями, які дозволяють змінювати величини, що характеризують їх параметри. Моделювання різних елементів здійснюють на спеціальних стендах, де відтворюють випадкові процеси зміни параметрів комплектуючих елементів.

Частковим видом статистичних методів випробувань, застосовуваним на практиці, є *граничні випробування виробів*.

Граничні випробування проводяться для визначення залежностей між гранично припустимими значеннями параметрів об'єкта та режимом експлуатації. Вони є експериментальним методом, що заснований на фізичному моделюванні області значень первинних параметрів, при яких вихідні параметри виробів перебувають у межах допуску, тобто в області безвідмовної роботи виробів при змінах первинних параметрів. Однак визначити область безвідмовної роботи виробів при одночасній зміні багатьох первинних параметрів не представляється можливим. Тому часто на практиці знаходять граничні точки області безвідмовної роботи виробів при зміні будь-якого одного первинного параметра виробів (параметр граничних випробувань), зберігаючи значення інших незмінними. У цьому і полягає зміст граничних випробувань.

2.2.2 Класифікація випробувань за видом дії

В реальних умовах експлуатації на РЕЗ впливає складний комплекс різноманітних факторів навколишнього середовища як природного, так і штучного походження.

Для оцінки надійності та якості РЕЗ у виробництві передбачаються наступні види випробувань РЕЗ з точки зору зовнішніх факторів:

- випробування на механічні впливи;
- випробування на кліматичні впливи;
- випробування на термічні впливи;
- випробування на біологічні впливи;
- випробування на радіаційні та спеціальні види впливів (електричні, електромагнітні, хімічні тощо).

Найбільш різноманітними за характером впливів та складністю в організації постановки виробничих випробувань є випробування на кліматичні впливи. Часто до цієї групи відносять також випробування на термічні впливи.

Види випробувань на **кліматичні (термічні) впливи**:

- випробування на підвищену температуру;
- випробування на знижену температуру;
- випробування на зміну температур;
- випробування на дії інею і роси;
- випробування на вплив підвищеної вологості повітря;
- випробування на вплив сонячного випромінювання;
- випробування на вплив пилу;
- випробування на вплив атмосферного тиску;
- випробування на вплив підвищеного гідростатичного тиску;
- випробування на вплив соляного туману;
- випробування на зовнішній вплив води;
- випробування на вітростійкість;
- випробування на герметичність.

Види випробувань на **біологічні впливи**:

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

Види випробувань на **механічні впливи**:

- випробування на визначення наявності і відсутності резонансних частот конструкцій;
- випробування на вібростійкість і віброміцність;
- випробування на ударну міцність і стійкість;
- випробування на вплив лінійних навантажень;
- випробування на вплив акустичного шуму.

Особливий вид для РЕЗ космічного застосування являють собою радіаційні та спеціальні види космічних випробувань.

2.2.3 Класифікація випробувань за програмними цілями і призначенням

За програмними цілями і призначенням випробування класифікуються на:

- дослідні;
- контрольні;
- порівняльні;
- визначальні.

Дослідні випробування проводяться для вивчення певних характеристик або властивостей РЕЗ. В ході випробувань проводиться:

- визначення або оцінка показників якості функціонування зразків РЕЗ або їх найкращих характеристик і властивостей;
- вибір найкращих (оптимальних) режимів роботи РЕЗ або найкращих тактико-технічних характеристик РЕЗ;
- порівняння варіантів реалізації об'єкта при проектуванні і атестації;
- побудова математичної моделі функціонування РЕЗ;
- аналіз істотних чинників, що впливають на показники якості функціонування РЕЗ;
- вибір виду математичної моделі РЕЗ (при необхідності).

Особливістю дослідних випробувань є факультативний характер їх проведення.

Контрольні випробування проводяться для контролю якості РЕЗ. Випробування цього виду становлять найбільш численну групу випробувань.

Порівняльні випробування проводять для порівняння характеристик аналогічних або однакових РЕЗ. На практиці часто виникає необхідність порівняти якість аналогів і прототипів або навіть однакових моделей РЕЗ, що випускаються різними підприємствами, за тактико-технічними характеристиками. Для цього випробують порівнювані об'єкти в однакових режимах і умовах.

Визначальні випробування проводять для визначення значень характеристик РЕЗ із заданими показниками точності, достовірності та надійності.

2.2.4 Класифікація випробувань на етапі проектування

На етапі проектування в залежності від стадії життєвого циклу продукції виділяють наступні види випробувань.

Доводжувальні випробування - дослідні випробування, що проводяться при доопрацюванні (доведенні) дослідного зразка виробу з метою оцінки впливу внесених в документацію (конструкторську і технологічну) змін для досягнення заданих тактико-технічних параметрів.

Попередні випробування - контрольні випробування дослідних зразків або настановних партій виробів з метою визначення можливих відхилень їх параметрів або виникнення дефектів в процесі серійного виробництва та можливості пред'явлення виробів на приймальні випробування.

Приймальні випробування - контрольні випробування дослідних зразків, настановних партій виробів або виробів одиничного виробництва, що проводяться з метою вирішення питання про доцільність впровадження цих виробів у виробництво або використання за призначенням.

2.2.5 Класифікація випробувань готової продукції

Для готової продукції, яка випускається у серійному виробництві, випробування можуть бути класифіковані на:

- кваліфікаційні;
- пред'явницькі;
- приймально-здавальні;
- періодичні;
- інспекційні;
- типові;
- атестаційні;
- сертифікаційні.

Кваліфікаційні випробування - контрольні випробування настановної партії або першої серійної партії, що проводяться з метою оцінки готовності підприємства до випуску виробу даного типу в заданому обсязі.

Пред'явницькі випробування - контрольні випробування продукції, що проводиться службою управління якістю або ВТК

підприємства-виготовника перед пред'явленням її для приймання представником замовника, споживача або інших органів приймання.

Приймально-здавальні випробування - контрольні випробування виробу під час приймального контролю.

Періодичні випробування - контрольні випробування виробів, що проводяться в обсягах та в терміни, встановлені нормативно-технічною документацією, з метою контролю стабільності якості виробів і оцінки можливості продовження їх серійного випуску.

Інспекційні випробування - контрольні випробування виробів, що проводяться у вибіркового порядку з метою оцінки ефективності та доцільності внесених змін в конструкцію РЕЗ або технологію виробництва.

У тих випадках, коли в виробничому процесі виявляють недоліки конструкції РЕЗ або технологічних процесів їх виготовлення, виникає необхідність вдосконалення конструкції і технологічних процесів: доцільність запропонованих змін виявляють за допомогою типових випробувань.

Типові випробування - контрольні випробування продукції, що випускається, які проводяться з метою оцінки ефективності та доцільності внесених змін в конструкцію або технологічний процес.

Атестаційні випробування - випробування, що проводяться для оцінки рівня якості виробів при їх підготовці до атестації за критеріями якості.

Сертифікаційні випробування - контрольні випробування виробів, що проводяться з метою встановлення відповідності їх тактико-технічних характеристик національним або міжнародним нормативно-технічним документам.

2.2.6 Класифікація випробувань за тривалістю проведення

За тривалістю проведення випробування поділяються на:

- нормальні;
- прискорені;
- скорочені.

Нормальні випробування - випробування, методи і умови проведення яких забезпечують отримання необхідного обсягу інформації про характеристики виробу в такий же інтервал часу, як й в умовах експлуатації, передбачених технічними умовами.

Прискорені випробування - випробування, методи і умови проведення яких забезпечують отримання необхідної інформації про характеристики виробу в більш короткий термін, ніж це визначено ТУ.

Скорочені випробування - випробування, що проводяться за скороченою програмою, за рішенням керівництва служби управління якістю підприємства.

2.2.7 Класифікація випробувань за результатом дії на стан виробу

За результатом дії на стан виробу випробування поділяються на:

- неруйнівні випробування;
- руйнівні випробування;
- випробування на міцність;
- випробування на стійкість;
- випробування на тривкість;
- з відновленням;
- без відновлення.

Неруйнівні випробування - випробування із застосуванням неруйнівних методів контролю.

Руйнівні випробування - випробування із застосуванням руйнівних методів контролю

Випробування на міцність - випробування, що проводяться для визначення значень впливаючих факторів, що викликають критичний вихід значень параметрів виробу за межі, встановлені ТУ, або його руйнування.

Випробування на стійкість - випробування, що проводяться для контролю здатності виробу виконувати свої функції і зберігати значення параметрів в межах, встановлених ТУ під час дії на нього певних факторів.

2.2.8 Класифікація випробувань за характеристикою об'єкта, що визначається

За характеристикою об'єкта, що визначається, випробування підрозділяються на:

- функціональні (параметричні) випробування;

- випробування на надійність;
- випробування на безпеку;
- випробування на транспортабельність;
- випробування на збереженість;
- ресурсні випробування;
- граничні випробування;
- технологічні випробування.

Функціональні (параметричні) випробування - випробування, що проводяться з метою визначення значень показників призначення РЕЗ

Випробування на надійність можуть бути визначальними і контрольними.

Визначальні випробування на надійність проводять для визначення статистичним шляхом фактичних значень кількісних показників надійності для одного типу або серії РЕЗ. Такі випробування проводять після освоєння знову розроблених або модернізованих РЕЗ, які виготовлені за технологією, що відповідає передбаченому виду виробництва (серійному або масовому). При визначальних випробуваннях проводиться також перевірка закону розподілу відмов для даного типу РЕЗ.

Контрольні випробування на надійність необхідні для контролю відповідності кількісних показників надійність вимогам стандартів або технічними умовами.

Оскільки в якості показників надійності РЕЗ прийняті ймовірність безвідмовної роботи, мінімальне напрацювання, ресурс, інтенсивність відмов і термін зберігання, то для визначення або контролю цих показників встановлено випробування на надійність наступних категорій: на безпеку, на довговічність, ресурсні, спеціальні, на збереженість.

Випробування на транспортабельність обумовлені вимогами, що пред'являються при перевезенні РЕЗ різними видами транспорту.

Граничні випробування проводяться для визначення залежності між гранично допустимими значеннями параметрів об'єкта і режимом експлуатації. Вони є експериментальним методом, заснованим на фізичному моделюванні області значень первинних параметрів, при яких вихідні параметри РЕЗ знаходяться в межах

допуску, тобто в області безвідмовної роботи РЕЗ, і режими функціонування при одночасній зміні багатьох первинних параметрів встановити не представляється можливим. Тому часто на практиці знаходять граничні точки області безвідмовної роботи РЕЗ при зміні будь-якого одного первинного параметра (параметр граничних випробувань), зберігаючи значення інших незмінними. В цьому і полягає сенс граничних випробувань.

Технологічні випробування - випробування, що проводяться при виготовленні продукції з метою оцінки її технологічності.

Також передбачені **комбіновані випробування**, під час проведення яких на зразок діють два та більше факторів одночасно.

З ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ

3.1 Загальні принципи проведення випробувань РЕЗ

В лабораторних і стендових випробуваннях застосовуються такі способи проведення:

- послідовний;
- паралельний;
- послідовно-паралельний;
- комбінований.

При послідовному способі один і той же об'єкт випробування послідовно піддається всім передбаченим програмою видам випробувань.

Ці випробування, як правило, проводяться на різних вибірках.

Послідовність випробувань передбачає зазвичай першочергове виявлення найбільш грубих дефектів апаратури, таких як наявність коротких замикань і обривів, при проведенні, наприклад, приймально-здавальних випробувань.

Важливою умовою проведення послідовних випробувань є дотримання певного порядку дії зовнішніх факторів.

Іноді при складанні програми передбачають таку послідовність дії зовнішніх факторів на об'єкт, згідно з якою на початку діють ті зовнішні фактори, що найбільш сильно впливають на нього. Це робиться для якнайшвидшого виявлення потенційно ненадійних зразків з метою скорочення часу випробувань. Однак при цьому втрачається велика частина інформації про вплив інших факторів, яка могла б бути отримана при їх впливі.

Тому частіше на практиці рекомендується починати випробування з впливу на РЕЗ найменш жорстких факторів, при яких вплив буде найменшим. Такий спосіб випробувань дозволяє точніше визначити причини відмов і скласти більш повну картину про наявність в РЕЗ потенційних дефектів. З іншого боку, якщо найбільш небезпечні для об'єкта зовнішні впливові фактори розташувати в кінці послідовних випробувань, то значно збільшується час їх проведення.

Як видно, послідовність проведення випробувань РЕЗ грає важливу роль.

Оптимальна послідовність проведення випробувань залежить від призначення РЕЗ, місця їх установки і передбачуваних умов експлуатації. Тому послідовність проведення випробувань для конкретного РЕЗ вказується в ТУ або програмі випробувань. У той же час рекомендується, наприклад, перед перевіркою герметичності і вологостійкості РЕЗ проводити механічні випробування, здатні викликати розгерметизацію апаратури. У цьому сенсі усі кліматичні випробування доцільно проводити після механічних випробувань.

Характерною особливістю послідовного способу проведення випробувань є наявність ефекту накопичення деградаційних змін фізичної структури об'єкта випробувань при переході від одного виду зовнішнього фактора до іншого, в результаті чого вплив кожного попереднього фактора впливає на результати випробувань при впливі подальшого, що, в свою чергу, ускладнює інтерпретацію результатів випробувань і збільшує знос РЕЗ.

При паралельному способі проведення випробувань зразки піддаються одночасному впливу різних зовнішніх факторів, що впливають паралельно на декількох вибірках. Такий спосіб дозволяє отримати великий обсяг інформації за значно коротший проміжок часу, ніж при послідовному способі, при мінімальному зношенні зразків.

Однак паралельний спосіб вимагає істотно більшої кількості випробовуваних виробів, ніж послідовний. До того ж зразки з різних партій піддаються впливу тільки окремих факторів, внаслідок чого втрачається значна частина інформації про їх взаємний вплив.

Компромісним між послідовним і паралельним способами проведення випробувань є **послідовно-паралельний спосіб**, що дозволяє в кожному конкретному випадку більш ефективно використовувати переваги того чи іншого способу і знаходити найоптимальніші варіанти їх поєднання. При послідовно-паралельному способі усі вироби, відібрані для випробувань, розбиваються на кілька груп, які випробовуються паралельно. У кожній з груп випробування проводять послідовним способом.

В даному випадку всі види випробувань повинні бути розбиті також на групи, число яких дорівнює числу груп випробовуваних виробів. За своїм складом групи випробувань формуються за видами

випробувань з тих міркувань, щоб, з одного боку, тривалість випробувань в усіх групах була приблизно однаковою, а з іншого щоб умови проведення об'єднаних в одну групу видів випробувань були близькі до реальних. Один із прикладів можливої розбивки видів випробувань на групи і послідовність їх проведення в кожній групі наведений в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Приклад групування різних видів випробувань при послідовно-паралельному способі їх проведення

Група	Види випробувань
1	1. Вібростійкість 2. Віброміцність при тривалому впливі 3. Ударна міцність 4. Ударна стійкість 5. Стійкість до впливу відцентрового прискорення 6. Вплив одиночних ударів з великим прискоренням 7. Циклічний вплив температури 8. Висотність 9. Вплив сонячної радіації
2	1. Теплотривкість при тривалому впливі 2. Вплив морського туману
3	1. Вологостійкість при тривалому впливі 2. Холодостійкість 3. Вплив інею і роси
4	1. Грибостійкість

У табл. 3.2 наведена рекомендована послідовність комбінованих кліматичних та механічних випробувань.

Таблиця 3.2 - Послідовність механічних і кліматичних комбінованих випробувань

Випробування	Пояснення
А. Холод В. Сухе тепло N. Швидка зміна температури	Кліматичне випробування може викликати механічні напруги, які можуть зробити зразок більш чутливим до подальших випробувань.
Е. Удар F. Вібрація	Випробування можуть викликати механічні напруги, що призводять до негайної відмови зразка або підвищення його чутливості до подальших дослідів.
М. Атмосферний тиск Db. Вологе тепло (12 + 12- часовий цикл) С. Вологе тепло (постійний режим) К. Корозія L. Пил і пісок	Застосування випробувань може виявити температурні і механічні напруги, які виникають в процесі попередніх випробувань. Застосування випробувань може посилити результат впливу температурних і механічних напружень, викликаних попередніми випробуваннями.
Проникнення твердих частинок. Проникнення води, (наприклад дощу)	Повинні використовуватися випробування по МЕК 529 до завершення роботи по випробуванню Д і по випробуванню К в МЕК 68-2.

Однак кожен з розглянутих способів проведення випробувань передбачає, як правило, роздільний вплив на об'єкт зовнішніх факторів, що є істотною відмінністю від реальних умов його експлуатації.

З метою наближення лабораторних умов випробувань об'єкта до реальних умов його експлуатації все більшого поширення починає

отримувати **комбінований спосіб** випробувань, при якому на об'єкт випробування одночасно впливають кілька зовнішніх факторів. Так, для імітації умов вібрації об'єкта в космічному просторі використовують лабораторні випробування на вібрацію при одночасному впливі на об'єкт низької температури і вакууму.

Основним обмеженням широкого застосування лабораторних та стендових випробувань при комплексній дії зовнішніх факторів є відсутність необхідного обладнання, а також складність і дорожнеча їх проведення.

Слід зазначити, що функціональне різноманіття РЕЗ, що розроблюються та випускаються, не дозволяє дати однозначно рекомендації з вибору того чи іншого способу та порядку застосування зовнішніх факторів при лабораторних та стендових випробуваннях. Але можна сказати, що вибір алгоритму випробувань повинен проводитися виходячи з результатів впливів того чи іншого фактора на конкретний вид об'єкта випробувань і умов його подальшої експлуатації, щоб в процесі випробувань механізм відмов РЕЗ посилювався і усі потенційно ненадійні зразки були обов'язково виявлені.

3.2 Програма випробувань

Загальні цілі контрольних, порівняльних та визначальних випробувань, загальний розподіл випробувань на впливи механічних і кліматичних факторів конкретизовані у Державних стандартах.

Основним організаційно-методичним документом при конкретних випробуваннях РЕЗ є програма випробувань (ПВ) та методика випробувань (МВ). Зміст ПВ та вимоги до оформлення наведені у стандарті [4].

ПВ регламентує цілі випробувань, обсяг і методику досліджень, що проводяться, порядок, умови, місце і терміни проведення випробувань, відповідальність за забезпечення та проведення випробувань, відповідальність за оформлення протоколів і звітів.

У ПВ в короткій формі викладається інформація про об'єкт випробування (термін його виготовлення, номер паспорта, особливості конструкції і технології виготовлення і т. ін.), а також параметри, що підлягають прямому чи непрямому вимірюванню,

критерії придатності виробу РЕЗ, вимоги до зовнішнього вигляду і електричні параметри.

На титульному аркуші ПВ розміщують: найменування програми, назву теми, за якою ведеться розробка виробу; погоджуючі та затверджуючі програму підписи керівників організації-розробника РЕЗ і, при необхідності, представника замовника.

Програма випробувань складається з шести розділів.

3.2.1 Розділ 1. Об'єкт випробувань

Він включає в себе найменування, децимальний номер, заводський номер, дату випуску об'єкта випробувань.

При складанні **розділу 1** слід враховувати, що за результатами випробувань об'єкта приймається те чи інше рішення щодо його придатності або бракування, пред'явлення на наступні випробування або можливості серійного випуску.

Об'єктами випробувань можуть бути: макети, моделі, експериментальні зразки виробів, виготовлені при виконанні науково-дослідних робіт (НДР) на етапах проектування; дослідні зразки виробів, виготовлені при виконанні дослідно-конструкторських робіт (ДКР); зразки, виготовлені при впровадженні або освоєнні виробу у виробництві; зразки, виготовлені в ході встановленого серійного чи масового виробництва.

Випробуванням піддають вироби, відповідні НТД з конструкції, зовнішнього вигляду, а також параметрів, що визначаються при нормальних кліматичних умовах (НКУ).

Вироби необхідно випробувати в тому вигляді та стані, в якому вони будуть реально експлуатуватися, транспортуватися, зберігатися.

Якщо складові частини виробу при монтажу, транспортуванні та експлуатації знаходяться в неоднакових умовах, їх можна випробувати окремо відповідно до умов експлуатації кожної частини. У цьому випадку допускається також проводити випробування виробу в цілому, але за програмою, яка враховує умови експлуатації.

Якщо масогабаритні характеристики виробу не дозволяють випробувати його в умовах лабораторії, то необхідну інформацію про працездатність і збереження зовнішнього вигляду після впливу

об'єктивних факторів отримують за результатами аналізу випробування складових частин виробу.

Якщо конструктивно виріб не може бути розділений на складові частини, то випробування (окремі види випробувань) слід проводити за програмою, яка враховує реальні умови експлуатації при необхідних значеннях факторів, що впливають. Допускається в цьому випадку випробувати також макети, якщо конструкція і технологія виготовлення макетів забезпечують їх подібність до реального виробу.

При випробуванні виробу за складовими частинами кріплення їх на стендах має виконуватися аналогічно кріпленню їх в реальній структурі конструкції виробу. При цьому повинні бути враховані впливи (теплові, механічні) складових частин виробу. Ступінь відповідності результатів випробування складових частин виробу або макетів результатам випробування реального виробу залежить від мети випробування, характеру і достовірності інформації про виріб.

Залежно від виду і етапу розробки РЕЗ об'єктом випробування може бути одиничний виріб або партія виробів, що піддається суцільному або вибіркового контролю, окремий зразок або партія, від якої береться вказана у НТД вибірка (проба).

Наприклад, на випробування пред'являється партія виробів об'ємом N . З цієї партії береться вибірка об'ємом n , яка проходить випробування. Результати випробувань вибірки поширюються на всю партію N виробів. У цьому випадку об'єктом випробувань є вся партія виробів.

Якщо об'єктом випробувань є макет або модель виробу, то результати випробувань відносяться безпосередньо до макету або моделі. Однак, якщо при випробуванні будь-якого виробу деякі його елементи замінюють моделями або окремі характеристики виробу визначають за моделями, то об'єктом випробувань залишається сам виріб, а оцінку характеристик цього виробу отримують на основі випробувань моделі.

При виборі об'єкта випробувань враховують такі вимоги:

- необхідність доказу працездатності виробу при обумовлених в НТД умовах експлуатації;
- необхідність підтвердження відповідності параметрів надійності виробу (виробів) значенням, що вимагаються НТД;

- мінімальна вартість випробувань (включаючи витрати на випробувальне обладнання);
- мінімальна тривалість випробувань;
- наявність відповідного обладнання та оснащення, що забезпечують проведення випробувань;
- необхідність забезпечення взаємозамінності окремих функціональних частин і блоків;
- можливість забезпечення оптимального контролю технологічних процесів;
- необхідність визначення параметрів надійності комплектуючих елементів, що застосовуються у виробі.

Слід зазначити суперечливий характер перших чотирьох вимог.

Так, при сучасних тенденціях мікромініатюризації комплектуючих виробів РЕЗ зростає трудомісткість повної перевірки їх працездатності.

Отримання більш об'єктивних показників надійності виробів пов'язане з ростом числа об'єктів і тривалості їх випробувань. Це також здорожчує випробування на надійність.

3.2.2 Розділ 2. Мета випробувань

У цьому розділі повинні бути сформульовані цілі випробувань, які можуть бути досить різноманітні.

Мета випробувань визначає всю програму випробувань.

Так, наприклад, **метою дослідних випробувань** може бути *експериментальна оцінка* впливу кліматичних і механічних факторів на стійкість електронної апаратури.

Метою контрольних випробувань на вплив зовнішніх факторів *є визначення* з деякою часткою ймовірності *здатності виробів зберігати працездатність і параметри* в заданих умовах навколишнього середовища шляхом імітації реальних умов навколишнього середовища або шляхом відтворення їх впливів.

З метою стабільності якості продукції та можливості продовження її випуску проводять **періодичні випробування** продукції в обсязі і в терміни, встановлені нормативно-технічними документами. Цей вид контрольних випробувань проводиться щомісяця або щоквартально, а також на початку випуску апаратури

або при поновленні виробництва, після тимчасового його припинення. Результати періодичних випробувань поширюються на всі партії, випущені протягом певного часу. Періодичні випробування включають в себе такі випробування, при яких виробляється частина ресурсу апаратури, наприклад, багаторазові удари, термоцикування тощо, тому вони завжди є вибірковими.

Типові випробування - це контрольні випробування продукції, що випускається, які проводяться з *метою оцінки ефективності та доцільності внесених змін* в конструкцію або технологічний процес.

Цілі випробувань розкривають їх призначення і повинні бути відображені у назві випробувань. Тому, щоб сформулювати назву випробувань, необхідно встановити їх призначення, тобто визначити за метою випробувань, до якої з чотирьох груп (дослідні, контрольні, порівняльні, визначальні) їх можна віднести.

У назві випробувань повинні бути враховані і інші ознаки виду випробувань (тривалість, вид і результат впливу та ін.).

Назва випробувань може містити два і більше ознак з числа перерахованих, наприклад, дослідні лабораторні випробування експериментальних зразків приймальної апаратури на вплив механічних і кліматичних факторів.

3.2.3 Розділ 3. Обґрунтування необхідності проведення випробувань

У цьому розділі вказуються документи, в яких регламентована необхідність проведення випробувань (технічне завдання, технічні умови тощо).

3.2.4 Розділ 4. Місце проведення та забезпечення випробувань

Цей розділ містить найменування підрозділу, в якому проводяться випробування, наприклад, відділ випробувань.

Тут також вказується час і дата початку та закінчення випробувань, а також наводиться план робіт з підготовки і проведення випробувань.

План робіт містить перелік робіт, необхідних для проведення випробувань: виготовлення зразків, приймання зразків відділом технічного контролю (ВТК), вимірювання і визначення параметрів

зразків перед випробуваннями, підготовка пристроїв для випробувань, проведення випробувань, оформлення результатів випробувань, погодження та затвердження протоколу випробувань та ін.

3.2.5 Розділ 5. Обсяг і методика випробувань

Цей розділ складається з двох підрозділів.

У першому підрозділі вказуються умови випробувань (кількість зразків, розподіл їх на групи, послідовність проходження випробувань різними групами за видами впливів), обладнання.

Під умовами випробувань розуміють сукупність впливів на об'єкт і режими його функціонування.

Умови випробувань характеризуються впливом на об'єкт як об'єктивних, так і суб'єктивних факторів.

Оскільки основне завдання випробувань полягає в отриманні інформації про потенційно ненадійні вироби, вибору факторів, що впливають, надається першочергове значення.

При цьому необхідно враховувати: етап проектування або тип виробництва, призначення РЕЗ, рівень декомпозиції об'єкта випробувань, категорію (об'єкт установки) РЕЗ, зовнішні дестабілізуючі фактори.

Основні принципи вибору факторів, що впливають, наступні:

- адекватність умов випробувань умовам експлуатації;
- врахування механізмів старіння або розвитку відмови;
- врахування потенційної ненадійності елементів конструкції.

Види основних кліматичних і біологічних випробувань, яким піддаються вироби РЕЗ, наведені в табл. 3.3, механічних випробувань - в табл. 3.4.

Позначення «+» означає, що випробування проводять; «-» - випробування не проводять; «в» - випробування можуть бути проведені, якщо це передбачено нормативно-технічною документацією на виріб.

Для кожної конкретної конструкції необхідно вибрати номенклатуру зовнішніх впливів, характерну для умов експлуатації, щоб забезпечити адекватність умов випробувань умовам експлуатації.

При експлуатації, як правило, має місце більш жорсткий вплив на РЕЗ в порівнянні зі стендовими або лабораторними випробуваннями. Тому для випробувань слід вибрати значення

зовнішніх впливів, які перевищують характерні значення для нормальних умов експлуатації.

Найбільш ефективно виявити потенційно ненадійні вироби дозволяють удари, тепло, волога і електричні навантаження. Випробування на вібрацію є засобом контролю якості РЕЗ після складання.

У табл. 3.5 у якості прикладу наведені види випробувань, що проводяться у одному з випробувальних центрів сертифікації радіоелектронної техніки з вказівкою обладнання для випробувань.

Таблиця 3.3 - Види основних кліматичних та біологічних випробувань

Вид випробувань	Склад випробувань	
	Етап розробки (ДКР). Типові випробування	Періодичні випробування
Теплостійкість	+	+
Холодостійкість	+	+
Вологостійкість тривала	+	в
Вологостійкість короткочасна	+	+
Знижений атмосферний тиск	+	в
Підвищений атмосферний тиск	+	в
Вплив сонячної радіації	+	-
Вплив соляного туману	+	-
Вплив пилу та піску	+	-
Вплив інею та роси	+	-
Термоудар	+	+
Грибостійкість	+	-

Таблиця 3.4 - Види основних механічних випробувань

Вид випробувань	Склад випробувань	
	Етап розробки (ДКР). Типові випробування	Періодичні випробування
Випробування на знаходження резонансних частот	+	-
Вібростійкість	в	+
Віброміцність тривала	+	в
Віброміцність короткочасна	-	в
Ударна стійкість	+	-
Ударна міцність	+	-
Випробування на вплив одиночних ударів	+	-
Випробування на вплив лінійних прискорень	+	-
Випробування на вплив акустичного шуму	+	-

Другий підрозділ включає відомості про контрольовані параметри виробу із зазначенням документації, за якою потрібно виміряти або визначити ці параметри.

3.2.6 Розділ 6. Оформлення результатів випробувань

Тут регламентується форма подання звітності за результатами випробувань: протокол, звіт, технічна довідка.

За результатами випробувань складається зведена відомість відмов, та на основі її аналізу розробляється та впроваджується комплекс заходів з їх усунення.

3.2.7 Загальні вимоги до ПВ

Номенклатура та зміст загальних вимог до ПВ в залежності від етапів проведення оформлюються у вигляді карти проведення випробувань.

Приклад карти проведення випробувань для етапу проектування виробів наведений у табл. 3.6.

Таблиця 3.5 - Види випробувань та характеристики випробувального обладнання

Вид випробування	Загальні технічні характеристики випробувального обладнання	Типи обладнання
Випробування на механічні впливи		
Вібрації	Частоти 10...10000 Гц	УВЭ-1/10000
	Макс. віброприскорення до 40 g	УВЭ-1/004
	Вантажопідйомність до 5 кг	УВЭ-5/10000
Механічні поодинокі удари	Пікове ударне прискорення 1500...50000 g	К-5/3000
	Тривалість ударного імпульсу 0,1...1,0 мс	К-0,1/10000
Багаторазові удари	Пікове ударне прискорення 5...150 g	К-0,1/50000
	Тривалість ударного імпульсу 1...20 мс	УУЭ-20/200
Лінійні прискорення	Постійне лінійне прискорення за вісями X, Y, Z - 50000 g	G-385-1В
Акустичні впливи	Частоти 125...10000 Гц Рівень звукового тиску до 160 дБ	АУ-1
Випробування на кліматичні впливи		
Підвищена температура	Температури від НКУ до +350°C	КТ-0,4-350
	Максимальний об'єм камери до 0,5 м ³	12КТ-0063-026
Знижена температура	Температури від НКУ до -85°C	VMТ07/64
	Максимальний об'єм камери до 0,4 м ³	МС-81
Зміна температур	Діапазон температур від -65°C до +200°C	12КТЦ-65/200
	Максимальний об'єм камери до 0,02 м ³	
Підвищена вологість при підвищеній температурі	Діапазон температур від +40°C до +90°C	12КТВГ-0,4-0,01
	Відносна вологість до 95%	
	Максимальний об'єм камери до 0,4 м ³	
Соляний туман	Діапазон температур від +25°C до +90°C	12КТМТ-0,4-001
	Дисперсність туману 1...10 мкм	
	Водність аерозолю 2...3 г/м ³	
	Максимальний об'єм камери до 0,4 м ³	
Сонячна радіація	Діапазон температур від +50°C до +70°C	КСР-1
	Щільність випромінювання 1120 Вт/м ²	
	У УФ-частині спектру 68 Вт/м ²	
	Максимальний об'єм камери до 0,4 м ³	
Динамічний пил	Діапазон температур від +25°C до +60°C	КП-3-0,5М
	Швидкість обдуву 15 м/с	
Статичний пил	Діапазон температур від +25°C до +60°C	КП-016-001
	Швидкість обдуву 0,5 м/с	
Дош	Інтенсивність дощу 3...110 мм/хв.	КД-0,4 12КТХБ-0,4
	Максимальний об'єм камери до 0,4 м ³	
Цвіліві гриби	Температура +29°C Відносна вологість до 100%	Термостатна кімната

Таблиця 3.6 - Карта проведення випробувань на етапі проектування

Розділ ПВ	Випробування		
	дослідні доводжувальні	контрольні попередні	контрольні приймальні
Мета випробувань	Оцінка впливу змін, внесених у конструкцію та технологію виготовлення об'єкта для досягнення показників якості	Визначення можливості пред'явлення на приймальні випробування	Вирішення питання запуску продукції у виробництво або використання її за призначенням
Обсяг випробувань	Визначається головним конструктором	Визначається НТД	Дослідна партія
Вироби, що випробуються	Макетні зразки	Експеримент. зразки дослідного виробництва	Вироби дослідної партії
Технічна документація	Ескізи, технічна записка про проведення випробувань	Затверджена КД	Затверджена КД, ТУ, МВ
Методика випробувань	Задається завданням на випробування	Методика згідно з НТД	Методика згідно з НТД
Документація на випробувальне обладнання	-	Атестоване обладнання	Атестоване обладнання
Звітність	Службовий зошит, технічний звіт	Звіт з даними про випробування	Звіт з результатами випробувань та короткі висновки

3.3 Методика випробувань

Ще одним організаційно-методичним документом є методика випробувань РЕЗ, яка є часткою програми випробувань (ПВ), або може бути окремим документом.

У ній викладаються:

- метод випробувань,
- засоби і умови випробувань,
- порядок відбору вибірок,
- алгоритми виконання операцій по визначенню однієї або декількох характеристик виробу, що випробовується;

- форми представлення даних і оцінки точності та достовірності результатів;
- вимоги техніки безпеки і охорони навколишнього середовища.

По суті, методика випробувань визначає процес (технологію) проведення випробувань. Вона може бути викладена в самостійному документі або в програмі випробувань.

Основною вимогою до методики є забезпечення максимальної ефективності процесу випробувань і мінімально можливі похибки отриманих результатів. Вона включає вимоги до методу і умов випробувань та технічних засобів.

Метод випробувань - сукупність правил застосування певних принципів і засобів для реалізації випробувань, що дозволяють визначити перевірку виробів на відповідність вимог НТД.

При виборі методу враховують конструктивно-технологічні особливості виробів, норми на контрольовані параметри, точність вимірювань, вимоги безпеки проведення випробувань.

У методах випробувань конкретних РЕЗ повинні бути передбачені впливи на вироби об'єктивних факторів (прямих і непрямих) за нормами, встановленими НТД.

Для більшості випробувань дестабілізуючі фактори і їх значення розбивають на ступені жорсткості, що відповідають різним умовам експлуатації РЕЗ. Ці ступені позначаються арабськими або (частіше) римськими числами.

Всі випробування повинні забезпечувати мінімальні витрати при максимальному технічному ефекті.

Орієнтовний розподіл витрат за видами випробувань наведений у табл. 3.7.

Зміст методики випробувань можна представити у вигляді схеми (див. рис.3.1).

Методика випробувань повинна містити опис наступних етапів процесу випробувань:

- перевірку випробувального устаткування;
- підготовку випробувальних виробів;
- спільну перевірку випробувального устаткування і випробуваного виробу;
- реєстрацію результатів випробувань і даних про умови їх проведення.

Таблиця 3.7 - Розподіл витрат за видами випробувань

Вид випробування	Доля у варт. усіх випр., %	Вид випробування	Доля у варт. усіх випр., %
Визначення резонансних частот	2,4	Вологостійкість короткочасна	2,7
Вібростійкість	3,2	Вологостійкість тривала	3,6
Віброміцність	5,0	Вплив підвищеного тиску	0,8
Ударна міцність	0,5	Вплив зниженого тиску	0,9
Випадкова вібрація	5,7	Вплив сонячної радіації	2,7
Вплив одиночних ударів	1,7	Термоудар	4,7
Вплив лінійних прискорень	0,7	Грибостійкість	1,7
Холодостійкість	0,7	Вплив соляного туману	2,4
Теплостійкість	0,7	Надійність	7,5
Термоцикування	3,6	Довговічність	49,0

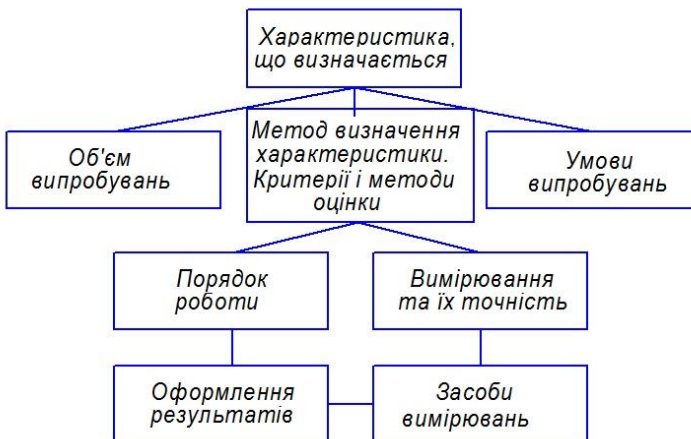


Рисунок 3.1 - Схема змісту методики випробувань

Перевірка пристроїв для випробувань і підготовка їх до випробувань мають вирішальне значення для успішного проведення випробувань.

За технічними можливостями пристрої для проведення випробувань повинні відповідати етапам життєвого циклу виробу. При цьому вимоги до характеристик цих пристроїв підвищуються з переходом від етапу проектування РЕЗ до експлуатації.

Засоби випробувань повинні бути атестовані, повинні бути визначені характеристики їх точності і придатність до роботи.

Підготовка виробів до випробувань включає вибір параметрів, що характеризують якість виробів, їх зовнішній огляд і вимірювання параметрів якості.

При виборі параметрів, що підлягають вимірам і контролю в процесі випробувань, необхідно виходити з вимог їх максимальної інформативності, чуттєвості до впливів і об'єктивній оцінці якості випробовуваних РЕЗ. Раціональний вибір обмеженого числа інформативних параметрів, критичних до впливу об'єктивних факторів, скорочує обсяг вимірювань при випробуваннях, отже, вартість випробувань.

Перед початком випробувань вироби необхідно витримати в НКУ протягом часу, необхідного для стабілізації параметрів.

У НКУ проводять зовнішній огляд і початкові вимірювання параметрів. Дані первинних вимірювань і контролю зовнішнього вигляду необхідно аналізувати, щоб встановити відповідність параметрів виробів вимогам НТД і відрізнити особливості кожного виробу (дефекти зовнішнього вигляду, нестійкість електричних параметрів).

При випробовуваннях послідовно-паралельним способом вироби необхідно розподілити за групами, підгрупами. Такий розподіл виробляють випадковим методом.

Всі вироби до постановки їх на випробування потрібно промаркувати.

Спільна перевірка пристроїв для випробувань і виробів, що випробуються, повинна показати, чи виконують пристрої для випробувань свої функції в процесі випробувань виробів. Така перевірка особливо важлива, якщо пристрої вперше застосовують для випробувань даних виробів.

Перевірку пристроїв для випробувань РЕЗ проводять або з макетним зразком, або з самим виробом.

В результаті перевірки переконуються в тому, що з їх допомогою можна виміряти і контролювати всі необхідні за НТД

параметри виробу, що випробовується, у встановленій послідовності і із заданою точністю.

Параметри пристроїв спочатку вимірюють без об'єкта випробувань при послідовному включенні всіх частин випробувальної системи, а потім з об'єктом випробувань.

Під час цих випробувань перевіряють методику калібрування пристроїв з внесенням до неї поправок в ході випробувань.

Умови проведення випробувань характеризують за допомогою завдання параметрів випробувальних режимів.

Для деяких випробувань необхідно описати випробувальне обладнання.

Вибираючи метод випробування, який слід застосовувати, розробник повинен враховувати економічні аспекти, зокрема, коли існує два різних випробування, за результатами яких може бути отримана однакова інформація.

Кожен тип РЕЗ випробовується за своєю методикою, яка встановлює порядок, умови, технологію випробувань, точність вимірювань в процесі випробувань, число циклів випробувань, перелік обладнання для випробувань. Перерва між випробуваннями повинна бути не більше трьох діб, за винятком випробувань на вологостійкість і холодостійкість, де перерва не повинна бути більше двох годин.

Якщо при роздільному впливі двох або більше зовнішніх факторів не забезпечується отримання бажаної інформації, слід скористатися комбінованими або складовими випробуваннями.

Відповідно до державних стандартів механічні та кліматичні випробування проводять з метою перевірки відповідності виробів РЕЗ вимогам, встановленим в ТЗ, стандартах і ТУ на вироби конкретних класів і типів.

Випробуванням піддається РЕЗ або окремі її частини, число яких встановлюють в ТУ на вироби і в програмі випробувань.

Всі випробування проводять в НКУ (за винятком кліматичних), які характеризуються такими значеннями параметрів:

- температура повітря + 15...35 ° С;
- відносна вологість повітря 45...80%;
- атмосферний тиск 84...106 кПа (630...800 мм рт. ст.).

Випробування послідовно включають в себе:

- початкову стабілізацію (за потреби);

- початкову перевірку і вимірювання (за потреби);
- витримку;
- кінцеву стабілізацію (за потреби);
- заключні перевірки і вимірювання (за потреби).

При механічних випробуваннях проводиться визначення міцності і стійкості конструкції виробу при впливі вібрацій, ударів, лінійного прискорення, акустичного шуму.

При кліматичних випробуваннях виріб піддається впливу підвищеної і зниженої температур, термоциклування, підвищеної і зниженої вологості, тиску, інею, роси, соляного туману і т.ін.

При випробуваннях на відповідність конструктивно-технологічним вимогам виріб піддають впливу агресивних середовищ, випробуванню на герметичність, на здатність до пайки, на теплостійкість при пайці, на пожежобезпечність, вибухозахищеність і інші. Діапазон параметрів факторів, що впливають, застосовуваних при випробуваннях досить широкий, і залежить від класу апаратури і умов її експлуатації.

Коли виникає необхідність в проведенні випробувань РЕЗ міжнародного використання на вплив зовнішніх факторів, слід користуватися методами випробувань, зазначеними в СТ МЕК 68-2, за винятком тих випадків, коли відповідний метод випробувань відсутній. Для цього є такі підстави:

- повна відповідність з методами випробування СТ МЕК 68-2 необхідна для забезпечення повторюваності і відтворюваності результатів;

- випробування СТ МЕК 68-2 підходять для застосування до різноманітних зразків; вони розроблені незалежно від виду випробуваного зразка;

- результати, отримані в різних лабораторіях, можуть бути порівняні;

- виключається поширення методів випробувань та обладнання, що мало відрізняються один від одного;

- тривале використання одного і того ж випробування дозволяє порівнювати результати попередніх випробувань зразків, технічні характеристики яких в умовах експлуатації відомі.

3.4 Загальна структура і методичні принципи проведення випробувань на механічні впливи

Механічні випробування РЕЗ дозволяють виявити наявність дефектів, визначити динамічні характеристики РЕЗ, провести оцінку впливу конструктивних дефектів на параметри якості РЕЗ, перевірити відповідність параметрів РЕЗ при механічному впливі вимогам ТУ. При цьому застосовуються такі види механічних випробувань:

- на наявність і відсутність резонансних частот;
- на вібростійкість;
- на віброміцність;
- на ударну стійкість;
- на вплив одиночних ударів;
- на лінійні відцентрові навантаження і акустичні шуми.

Під час механічних випробувань слід визначати різницю між частотами механічних впливів. Для цього використовується поняття октави.

Октава - різниця між частотами у логарифмічному масштабі.

Кількість октав між двома частотами можна визначити за формулою:

$$N = \log_2 \frac{f_B}{f_H} = \frac{\lg \frac{f_B}{f_H}}{\lg 2}$$

де: N - кількість октав між двома частотами;

f_B та f_H - відповідно верхня та нижня частота.

Дослідження різних видів механічних випробувань показали, що найбільший вплив на РЕЗ оказує поєднання вібраційних навантажень і одиночних ударів, тому ці випробування проводять у першу чергу, а інші види механічних впливів є додатковими.

Випробування по визначенню резонансних частот конструкції допускається проводити на окремих типах (типорозмірах, тіпономіналов) виробів, що мають однакову конструкцію.

Випробування на перевірку відсутності резонансних частот конструкції виробу в заданому діапазоні частот не проводять, якщо це

забезпечується їх конструкцією, про що слід зазначити в ТУ на вироби.

Випробування на вібростійкість допускається суміщати з випробуванням на віброміцність, проводячи його на початку або в кінці випробувань на віброміцність. При цьому швидкість зміни частоти вібрації не повинна перевищувати 1 октави в хвилину.

Випробування на віброміцність і вібростійкість при впливі синусоїдальної вібрації в діапазоні частот нижче 10 Гц і випробування на віброміцність і вібростійкість при впливі широкосмугової випадкової вібрації в діапазоні частот нижче 20 Гц не проводять, якщо нижча резонансна частота виробу перевищує 25 Гц.

При наявності вимог з міцності і (або) стійкості до впливу широкосмугової випадкової вібрації вироби, що мають чотири або більше резонансів в робочому діапазоні частот, випробують на вплив широкосмугової випадкової вібрації; вироби, що мають менше чотирьох резонансів в робочому діапазоні частот, випробують на вплив синусоїдальної вібрації.

Випробуванням на ударну міцність не піддають вироби, у яких нижча резонансна частота перевищує 1000 Гц. Ударна міцність і (або) стійкість таких виробів забезпечується їх конструкцією.

Випробування на ударну стійкість рекомендується суміщати з випробуваннями на ударну міцність, проводячи його в кінці випробувань на ударну міцність в кожному напрямку впливу.

При відсутності технічної можливості проводити випробування на віброміцність та ударну міцність на окремих виробках допускається проведення випробувань виробів в складі конкретного об'єкта.

Випробування на міцність або стійкість при впливі лінійного прискорення не проводять, якщо передбачено випробування на вплив ударів одиночної або багаторазової дії з прискоренням, рівним або більшим, ніж лінійне.

Випробуванню на вплив акустичного шуму не піддають вироби, що задовольняють одному або декільком з наступних умов:

- вказаний у ТЗ або ТУ рівень впливу акустичного тиску на виріб 130 дБ і менш;

- виріб не має внутрішніх порожнин (наприклад, трансформатори, дроселі, модулі та мікромодулі, залиті компаундом, і т. ін.);

- нижча резонансна частота конструкції виробу перевищує верхню частоту діапазону частот випробувань на вплив акустичного шуму;

- параметри виробів за конструкцією і принципом роботи не залежать від впливу акустичного шуму, про що повинно бути зазначено в ТУ на вироби.

Застосовувані види механічних випробувань і їх послідовність вказуються в програмі випробувань і залежать від призначення РЕЗ, умов експлуатації, типу виробництва.

Число видів механічних випробувань і їх послідовність залежать від призначення РЕЗ, умов експлуатації, типу виробництва. Наприклад, в програму визначальних випробувань дослідного зразка і зразків установчої серії необхідно включати всі види механічних випробувань, а для зразків, що виготовляються в серійному виробництві - тільки випробування, передбачені в стандартах і ТУ на вироби.

3.4.1 Структура методики випробувань на механічні впливи

Рекомендується наступна структура методики механічних випробувань.

3.4.1.1 Підготовка виробів РЕЗ до випробування. Вона зводиться до вивчення технічної документації, зовнішнього огляду, вимірювання електричних параметрів відповідно до вказівки стандартів і ТУ на РЕЗ.

Вивчення технічної документації. При підготовці до проведення випробувань слід ознайомитися з наступною документацією:

- програмою випробувань (ПВ);
- ТУ або стандартами на вироби;
- інструкцією по проведенню випробувань;
- інструкцією по експлуатації випробувального устаткування;
- інструкцією по забезпеченню техніки безпеки.

3.4.1.2 Зовнішній огляд виробів. При проведенні зовнішнього огляду до персоналу пред'являються такі вимоги:

- гострота зору - в межах від 1 до 0,8 для обох очей;

- кольоровідчуття - нормальне.

Освітленість робочого місця при проведенні зовнішнього огляду повинна бути 50-100 лк.

Зовнішній огляд виробів проводять або неозброєним оком (візуально), або із застосуванням оптичних засобів (мікроскоп і т.д.) відповідно до вказівки стандартів і ТУ на вироби.

В процесі огляду особлива увага повинна приділятися таким місцям конструкції виробів, в яких виникають найбільші напруження і деформації. До таких місць в першу чергу відносяться:

- кріплення деталей виробу до опорних підстав (виводи, кріпильні лапи, стійки, кронштейни тощо);
- нарізні сполучення;
- паяні, зварні, клейово-зварні і клейові з'єднання;
- герметичні з'єднання і місця герметизації;
- кріплення пружин, пластин та інших пружних деталей, місця закладення виводів і т.п.

Вимоги до зовнішнього вигляду виробів і допустимі відхилення встановлюють в стандартах або ТУ на вироби.

3.4.1.3 Вимірювання електричних параметрів виробів.

Вимірювання електричних параметрів і перелік перевірених параметрів виробів і допустимих відхилень їх від норм встановлюють в стандартах і ТУ на вироби.

При проведенні випробувань послідовно на кілька видів впливів без зняття виробу з пристосування для кріплення можуть бути проведені додаткові вимірювання параметрів після установки виробу на пристосування.

3.4.1.4 Вибір випробувальної установки. Його проводять на підставі порівняння параметрів випробувального режиму (амплітуди, прискорення і переміщення, діапазон частот вібрації, прискорення), а також маси виробу, що випробовується і кріпильного пристосування з технічними даними вібраційних установок.

3.4.1.5 Вибір методу випробувань. Норми і методи випробувань встановлюються стандартами та технічними умовами на виріб відповідно до [9].

3.4.1.6 Вибір засобів вимірювання параметрів. Вимірювання параметрів проводять за допомогою засобів вимірювання, які входять

в комплект обладнання. Діапазон вимірювання параметрів повинен відповідати вимогам технічної документації на вимірювальні прилади.

3.4.1.7 Вибір контрольної точки проводять в залежності від масогабаритних характеристик виробу, що випробовується, кількості одночасно встановлюваних на столі вібростенда кріпильних пристосувань і можливості закріплення на них віброперетворювачів. Контрольна точка може бути обрана:

- на кріпильному пристосуванні;
- на робочому столі вібростенда;
- на випробувальному виробі;
- прийнята умовною.

3.4.1.8 Вибір пристосування для кріплення виробів і способів кріплення. Загальні вимоги, методи проектування, конструювання та перевірки пристосувань для кріплення малогабаритних виробів (маса виробів у вибірці не більше 0,1 кг) викладені в додатку 6 [8]. Кріплення виробів на пристосуванні і пристосування до столу вібростенда проводять відповідно до вказівок [8].

3.4.2 Вимоги до обладнання для механічних випробувань

Вібраційна установка і вібровимірювальна апаратура повинні бути перевірені на відповідність вимогам технічної документації, про що повинен бути зроблений відповідний запис у формулярі або іншому документі, прийнятому на підприємстві.

В процесі експлуатації повинні проводитися регулярні перевірки вібраційної установки. Ці перевірки бувають двох видів:

- перевірка перед початком нового випробування;
- перевірка після перерв у роботі установки при продовженні раніше початих випробувань (щоденна перевірка).

Перевірка вібраційної установки перед початком нових випробувань включає в себе:

- перевірку справності вібровимірювальної апаратури;
- перевірку справності вібраційної установки;
- перевірку вібраційної установки з встановленим виробом.

Випробувальний режим встановлюють за допомогою органів управління вібраційною установкою. Послідовність операцій з

установки випробувального режиму визначається інструкцією з експлуатації вібраційною установкою.

Деякі моделі обладнання для випробувань на мехнічні впливи наведені у [19], [20].

3.4.3 Проведення випробувань

Механічні випробування РЕЗ проводять в НКУ під електричним навантаженням або без нього. Вироби, що мають амортизатори, повинні кріпитися на амортизаторах. Якщо в ТУ передбачені різні способи кріплення при експлуатації, то виріб випробують при найбільш небезпечному способі кріплення. Час витримки в заданому режимі відраховують з моменту досягнення параметрів випробувального режиму.

Виріб повинен піддаватися вібрації по черзі в трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Якщо виріб має хоча б одну вісь симетрії, рекомендується проводити випробування в двох напрямках (вздовж і перпендикулярно осі симетрії). Якщо конструкція виробу така, що переважний вплив на нього матиме вібрація в одному напрямку, рекомендується проводити випробування виробів тільки в цьому напрямку.

Контроль режимів випробування проводять за показаннями вимірювальних приладів, які відносяться до складу вібровимірювальної апаратури.

Після закінчення випробувань проводять зовнішній огляд, вимірювання параметрів виробів відповідно до вимог стандартів і ТУ

За результатами випробувань оформляють протокол встановленої форми.

3.5 Загальна структура і методичні принципи проведення випробувань на кліматичні впливи

Випробування РЕЗ на вплив кліматичних факторів проводять для перевірки здатності виробів виконувати свої функції, зберігати параметри і зовнішній вигляд в межах встановлених норм при впливі кліматичних факторів.

Прийнята наступна структура методики випробувань РЕЗ на кліматичні впливи:

- попередня витримка (стабілізація властивостей виробів), початкові вимірювання параметрів і зовнішній огляд виробів;

- установка виробів в камери, витримка їх в умовах випробувального режиму, витяг з камер і відновлення (кінцева стабілізація властивостей);
- зовнішній огляд виробів і остаточні вимірювання параметрів виробу.

3.5.1 Попередня витримка

Попередню витримку проводять з метою повного або часткового усунення наслідків впливу на вироби попередніх умов. Вироби витримують, як правило, в НКУ.

Витримку виробів, на результати вимірювання параметрів яких може істотно впливати відносна вологість, виконують в умовах, що забезпечують відтворену товщину вологи, адсорбованої на поверхні виробу. Ці умови передбачають суворе підтримання температури при відносній вологості 73-77%.

Тривалість попередньої витримки визначається часом, достатнім для встановлення теплової рівноваги виробів з навколишнім середовищем. Зазвичай вона не перевищує 2 год. Початкові і заключні вимірювання параметрів виробів проводяться при одних і тих же значеннях температури і вологості навколишнього середовища.

3.5.2 Установка виробів у камери кліматичних випробувань

Під час установки виробів у камери кліматичних випробувань слід стежити за тим, щоб між виробами і стінками камери, а також між самими виробами вільно циркулювало повітря. З цією метою мінімальні відстані між виробами і стінками камери, а також між самими виробами мають бути не менш 100 мм.

Об'єм камери залежить від розмірів випробовуваної апаратури і значення теплорозсіювання з одиниці її поверхні та встановлюється з урахуванням рекомендацій державних стандартів.

Для зменшення впливу віддзеркалення теплового випромінювання від стінок камери на температуру у самій камері поверхня її стінок повинна мати коефіцієнт чорноти ϵ не менш 0,8.

Спосіб установки і положення виробів при випробуванні мають важливе значення для відтворюваності його результатів. Якщо при експлуатації можливі кілька варіантів положення виробу, то слід вибрати варіант, який би забезпечував найбільшу жорсткість випробування.

Якщо в процесі випробування електричне навантаження на РЕЗ не подається, вироби розташовують на сітках з капронових ниток, натягнутих на опори. При випробуванні з електричним навантаженням вироби встановлюють на спеціальних платах, пристосування (касетах, що контактують з пристроями). Металеві частини пристосувань обов'язково повинні мати антикорозійне покриття.

Час витримки в випробувальному режимі відраховують з моменту встановлення режиму в камері. Цей час при підвищеній (зниженій) температурі повинен бути достатнім для прогріву (охолодження) виробів за усім об'ємом.

Вважається, що вироби у вимкненому стані досягли температури довколишнього середовища (теплової рівноваги), якщо температура найпотужніших частин (або інших частин, зазначених в ПВ і ТУ), яка визначає прогрів за усім об'ємом, відрізняється від температури навколишнього середовища не більше ніж на $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Час прогріву (охолодження) виробів за усім об'ємом встановлюють на етапі попередніх випробувань за допомогою датчиків для контролю температури.

Допускається не контролювати температуру частин апаратури, якщо ці частини не мають захисту, призначеного для теплоізоляції. В цьому випадку виріб, в залежності від маси, витримують для досягнення температури навколишнього середовища. Час витримки залежить від маси виробів та наведений у табл. 3.8.

Таблиця 3.8 - Час витримки виробів для досягнення температури навколишнього середовища під час кліматичних випробувань

Маса виробу, кг	Час витримки, год.
менш 2	2
від 2 до 10	3
від 10 до 20	4
від 20 до 50	6
від 50 до 100	8
від 100 до 300	10

При неможливості вимірювання параметрів виробу без вилучення з випробувальної камери при різних видах випробувань допускається проводити ці вимірювання поза камерою. Методика і час

вимірювання параметрів після вилучення з камери обумовлюються в ПВ і ТУ на виріб.

Деякі моделі обладнання для випробувань на кліматичні впливи та їх основні характеристики наведені у [19], [20].

Після вилучення виробів з камери здійснюється їх зовнішній огляд відповідно до НТД.

3.5.3 Особливості проведення випробувань на кліматичні впливи на різних стадіях проектування. Нормалізована послідовність кліматичних випробувань

Кліматичні випробування проводять не тільки на стадії проектування РЕЗ, але і в серійному виробництві для відбракування потенційно ненадійних виробів (приймально-здавальні випробування) і для контролю стабільності виробництва (періодичні випробування).

Режими та умови випробування РЕЗ встановлюють залежно від ступеня жорсткості, який, в свою чергу, визначається умовами подальшої експлуатації РЕЗ в складі системи.

Вважається, що вироби витримали випробування, якщо вони під час і після його проведення задовольняють вимогам, заданим в ПВ і ТУ для даного виду випробувань.

Для підвищення інформативності та ефективності кліматичних випробувань при освоєнні і виробництві виробів доцільно проводити їх в послідовності, при якій кожне наступне випробування підсилює вплив попереднього, який міг би залишитися непоміченим.

Рекомендується так звана нормалізована послідовність кліматичних випробувань, що включає випробування:

- при підвищеній температурі;
- короткочасне випробування на вологостійкість в циклічному режимі (перший цикл);
- випробування на вплив знижених температури і атмосферного тиску;
- випробування на вологостійкість в циклічному режимі (інші цикли).

При цьому між будь-якими із зазначених випробувань допускається перерва не більше 3 діб, за винятком інтервалу між випробуваннями на вологостійкість і на вплив зниженої температури, який не повинен перевищувати 2 год. Параметри виробу зазвичай вимірюють на початку і в кінці нормалізованої послідовності.

4 ВІБРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ВВП)

4.1 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 (**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 параметра 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 звуться **параметричними**, **модуляторними** або **активними**. До активних перетворювачів відносяться фотоелектричні, гамма-квантові, смісні 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.

4.2 Основні параметри віброперетворювачів

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

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

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

Мінімальне значення вимірюваного параметра визначається напругою шуму узгоджуючого підсилювача:

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

4.2.3 Дійсний коефіцієнт перетворення ВВП – відношення зміни сигналу на виході ВВП до параметра вібрації на вході, що викликає цю зміну:

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

де: ΔE – зміна величини сигналу на виході;

ΔV – зміна вимірюваного параметра вібрації.

Якщо між E и V існує лінійна залежність, то:

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

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

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

4.2.6 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).

4.2.7 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.

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

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

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

4.3 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.

4.3.1 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.

4.3.2 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 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 ($S_{a_{max}}$) і величини зазору (So). В ряді випадків існують певні вимоги до величини даного співвідношення.

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

4.3.3 Погрішність установки зазору

Поріг чуттєвості 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 такого параметра, як погрішність установки зазору.

4.3.4 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.

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

Критичність до якості механічної розв'язки вібратора і вібруючого виробу з вібровимірювальною системою (випромінювача енергії і віброперетворювача) зв'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 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 вібруючим виробом і чутливим елементом віброперетворювача (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 віброперетворювачів, заснованих на зазначених методах.

4.4 Особливості застосування інерційних ВВП

Динамічний (інерційний) принцип дії ВВП полягає в тому, що вимір параметрів вібрації випробовуваного виробу заміняється виміром його змушених 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 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:

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

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

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

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

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

4.4.1 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.

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

4.4.3 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.

4.4.4 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 чутливості 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.

4.5 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.

4.5.1 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:

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

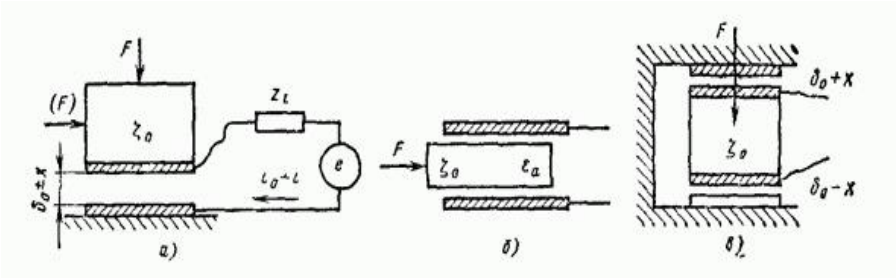
де: ϵ - діелектрична проникність міжелектродного простору;

S - площа електродів;

δ - зазор між електродами.

Варіанти принципових 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.

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

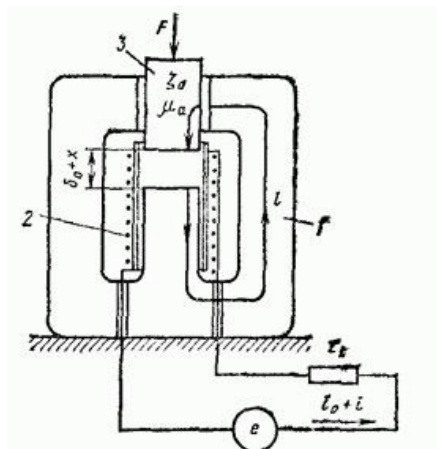
4.5.2 Індуктивні та електромагнітні ВВП

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).

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



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

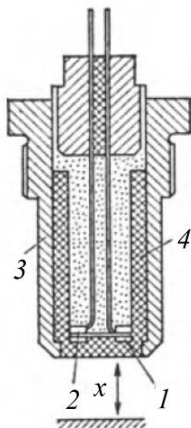
Рисунок 4.3 - Принцип дії індуктивного ВВП

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. Він відноситься до пасивних 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.



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

Рисунок 4.4 - Конструкція вихрострумowego проксиметра

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 валу та полярної діаграми траєкторії центру вала в радіальній площині.

4.5.3 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:

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

Чутливість 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 ґратка, 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**.

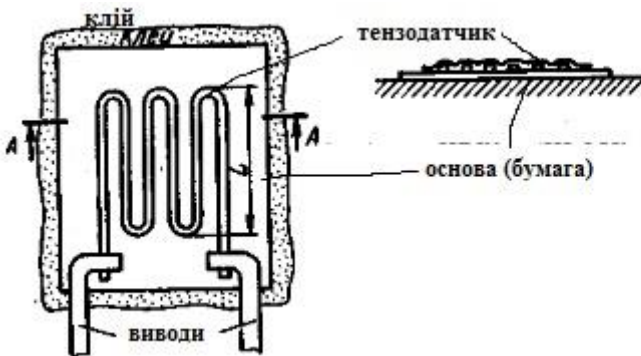


Рисунок 4.5 - Конструкція дротового тензодатчика

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 чутливість 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 дровових фольгові і плівкові тензодатчики мають ґратки не круглого, а прямокутного перетину з дуже великим співвідношенням ширини до висоти.

У порівнянні з дрововими 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/мм²).

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

Чутливість 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 $3 \dots 15$ мкм.

Опір фольгових датчиків знаходиться в межах $30 \dots 300$ Ом.

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

На рис. 4.6 показані різні типи фольгових тензодатчиків.

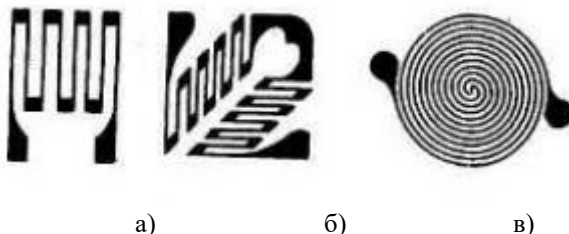


Рисунок 4.6 - Конструкції фольгових тензодатчиків

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.

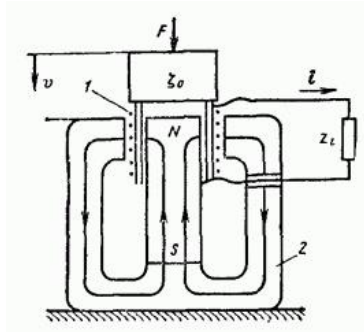
Найбільшого поширення набули германієві і кремнієві тензодатчики, причому останні здатні працювати при високих температурах (до 540°C) і великих механічних навантаженнях.

4.5.4 Електродинамічні ВВП

Принцип дії електродинамічного ВВП заснований на двох фізичних явищах: електромагнітній індукції та силовій 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 $\mu = BI$.

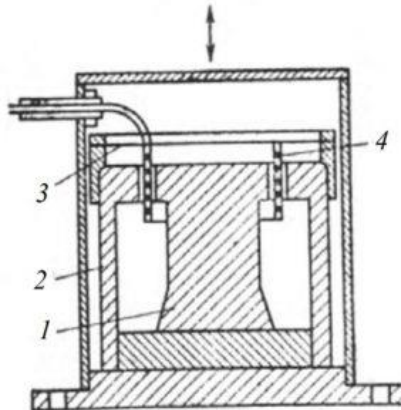
Існує багато різновидів перетворювачів такого типу, наприклад, з плоскою котушкою у однорідному магнітному полі, з рухомим магнітом, з перетворюванням лінійної швидкості в кутову и т.ін.

Електродинамічні ВВП мають великий вихідний сигнал та високу чуттєвість 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

4.5.5 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.

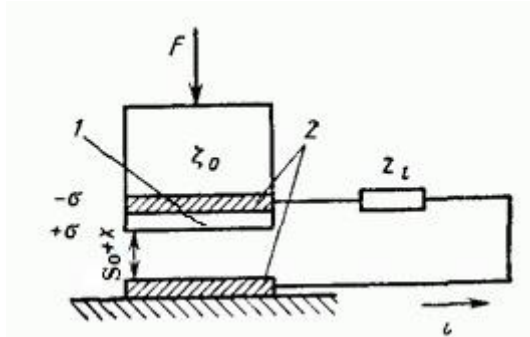
Електретом називається діелектрик, який здатен поляризуватися і потім тривалий час зберігати поляризований стан після зняття зовнішнього впливу, яке призвело до поляризації (або зарядження) цього діелектрика, створюючи в навколишньому просторі квазістале електричне поле. Таким чином, електрет є електричним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

Поляризація 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.

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



1 - електрет; 2 - електроди

Рисунок 4.9 - Принцип дії електретного ВВП

Електретний ВВП є конденсатором, ємність якого визначається за формулою:

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

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:

$$\sigma_{\text{инд}} = \frac{\sigma}{\frac{S\epsilon}{d} + 1} \quad (4.7)$$

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:

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

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

Опір навантаження:

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

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

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

При цьому:

$$C_\epsilon = C_0 + C_{вх} + C_\kappa$$

де C_0 – ємність електретного ВВП;

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

C_κ – ємність кабелю.

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

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

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

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

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

В електретних ВВП можна застосовувати діелектрики будь-якого виду.

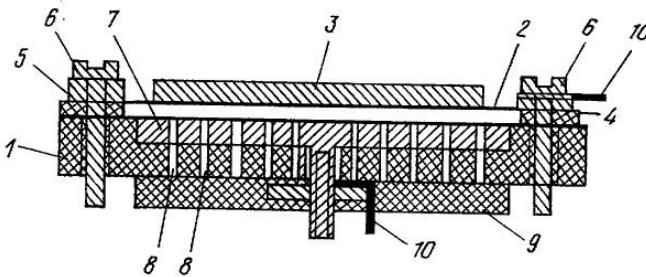
У технічних цілях найчастіше застосовуються електрети, отримані з тонких неполярних фторполімерних плівок товщиною 10...25 мкм, які можуть бути з одного боку покриті тонким шаром металу, найчастіше алюмінію. Металевий шар наносять методом вакуумного розпилення. Він служить одним з електродів пристрою, 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. 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.



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

4.5.6 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 чутливість, 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 $\mathbf{P}$ (чи електрична індукція $\mathbf{D}$), 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 ($\mathbf{P}$) ізотропного діелектрика, поміщеного в електричне поле $\mathcal{E}$, визначається за формулою:

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

де $\aleph$ - коефіцієнт поляризації.

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

Електрична індукція $\mathbf{D}$:

$$\mathbf{D} = \mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \mathcal{E} + \mathbf{P} = \mathcal{E}(\mathcal{E}_0 + \aleph), \left[\frac{k}{m^2} \right]$$

де $\mathcal{E}_0$ – електрична стала;

$\mathcal{E}$ – діелектрична проникність діелектрика.

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

$$\mathbf{D} = d \cdot \sigma \quad (4.10)$$

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 ξ - деформація;

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'єзоєфекті створюється зовнішнє поле у відсутності напруг у кристалі. Звідси умова взаємної оборотності для прямого і зворотного п'єзоєфекта, яка має вигляд:

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

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:

$$U_{\text{эж}}(t) = -\frac{m}{\mu_n^2 C_0} \frac{d}{dt} V(t) \quad (4.14)$$

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:

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

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 чутливість перетворювача до прискорення. Користаючись вищезазначеними формулами, можна вивести рівняння для визначення K_d , що дає можливість проаналізувати амплітудно-частотну характеристику перетворювача:

$$K_d = \frac{U}{a_d} = \frac{\mu_n}{\omega_0^2} \cdot \frac{C_0}{\sqrt{(C_0 + C_{ex})^2 + \frac{1}{\Omega^2 r_{ex}^2}}} \cdot \frac{m}{\sqrt{(k - \Omega^2 m) + \Omega^2 h^2}} \quad (4.16)$$

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

Ω – частота коливань;

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

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

h – коефіцієнт демпфірування.

В області нижчих частот можна зневажити сумою $C_0 + C_{вх}$ у порівнянні з $\frac{1}{\Omega \cdot r_{ex}}$ і тоді формула (4.16) приймає спрощений вигляд:

$$K_d = \mu_n \frac{r_{ex} \cdot C_0}{\omega_0} \cdot \frac{m}{\sqrt{(K - \Omega^2 m) + \Omega^2 h^2}} \left[\frac{Bc^2}{m} \right] \quad (4.17)$$

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:

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

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

Фізично цей завал пояснюється тим, що заряди на гранях п'єзоперетворювача відносно швидко стікають через $R_{вх}$, 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 $R_{вх}$, 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 $\mathcal{D} = 1 + 1,7$, 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 (4.19) за умови, що впливом демпфірування можна знехтувати, тобто $h \rightarrow 0$, і виконується умова (4.18):

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

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

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:

$$\mu_n = \frac{E}{\varepsilon} d \quad (4.20)$$

$$K_{\text{д}} = \frac{\mu_n}{\omega_0^2} = \frac{dl}{s\varepsilon} m = \frac{dS_n}{s\varepsilon} lb\Delta$$

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.

4.5.7 П'єзоелектричні ВВП - особливості конструкції

Конструкцію п'єзоелектричного ВВП, заснованого на прямому п'єзоефекті, 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;
- чуттєвість 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.

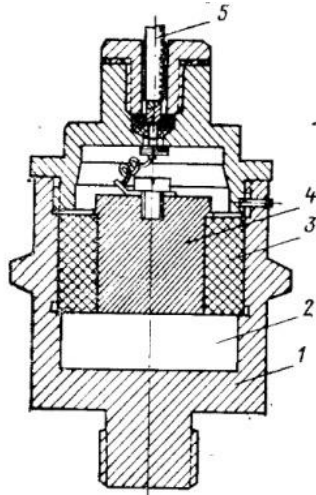
Особливістю **четвертої групи** є те, що п'єзоелемент виконано у формі циліндра і напруга на обкладинках з'являється внаслідок зсуву при сприйнятті перетворювачем механічних коливань за напрямком осі поляризації, що збігається з віссю центрального затиску.

Переваги конструкції:

- незалежність від умов навколишнього середовища;
- малі габарити;
- можливість виміру параметрів вібрації на високих частотах.

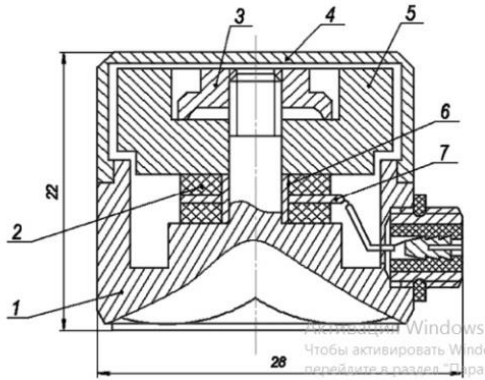
Сигнал з перетворювача знімається з торцевих поверхонь, перпендикулярних до осі поляризації.

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



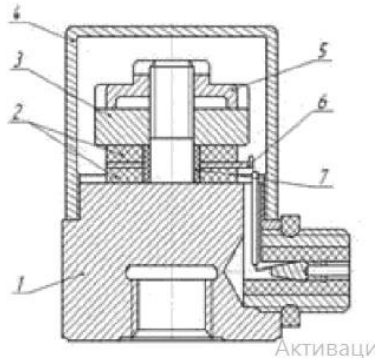
1 - корпус, 2 - п'єзоелемент, 3 - ізолятор, 4 - інерційна маса (тягар), 5 - вивід

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'єзoeлемент, 3 - інерційна маса (тягар), 4 - кришка, 5 - гайка, 6 - контакт, 7 - втулка

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



Рисунок 4.14 - П'єзoeлектричний ВВП ЛВП-А



Рисунок 4.15 - П'єзoeлектричний 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.

4.5.8 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.

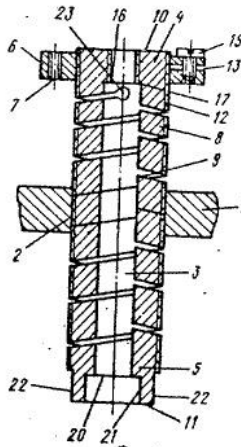


Рисунок 4.16 - Конструкція оптичного ВВП SU 1415070

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.

Конструкції та характеристики деяких видів ВВП наведені у [21] - [25].

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 ГОСТ 2.106-96. Единая система конструкторской документации. Текстовые документы.

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

6 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.

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

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

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

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

11 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.

12 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 Черняхівського. - 2018. - № 1, с. 86-92.

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

14 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.

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

16 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.

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

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

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

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

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

22 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).

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

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

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