



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет "Запорізька політехніка"

І.Є. Поспеева, Г.М. Шило, Т.І. Куляба-Харитонова

# **ВИПРОБУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ**

Навчальний посібник  
для студентів вищих навчальних закладів

Запоріжжя НУ "Запорізька політехніка" 2020

УДК 621.396.6.001.4 (075.8)

П62

*Рекомендовано до видання вченою радою національного університету  
"Запорізька політехніка"  
(протокол № 2/20 від 28.09.2020 р.)*

Рецензенти:

*Карпуков Л.М., доктор технічних наук, професор;*

*Бугрова Т.І., кандидат технічних наук, доцент*

**Випробування радіоелектронних засобів**  
П62 [Текст] / І.Є. Поспєєва, Г.М. Шило, Т.І. Куляба-Харитоновна / Навчальний посібник. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2020. – 281 с.

**ISBN 978-617-529-286-0**

Розглянуто збуджуючі фактори, що діють на сучасні радіоелектронні засоби та їх вплив на якість та надійність. Викладено основні методи випробувань радіоелектронних засобів на впливи зовнішніх факторів, їх класифікація та методики проведення згідно існуючим стандартам. Наведено принципи роботи та особливості конструкцій обладнання для випробувань і його складових частин. Приділяється увага сучасним методам випробувань з використанням моделей та методам комп'ютерного моделювання випробувань з використанням САПР.

Посібник призначений для студентів, що навчаються за напрямками «Радіоелектронні апарати та засоби», «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки» для дисциплін «Зовнішні впливи на РЕЗ та засоби захисту», «Методи та засоби дослідження РЕЗ» для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

**УДК 621.396.6.001.4 (075.8)**

ISBN 978-617-529-286-0

©Поспєєва І.Є., Шило Г.М.,

Куляба-Харитоновна Т.І., 2020

©Національний університет

"Запорізька політехніка" (НУЗП), 2020

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
<b>1 ЯКІСТЬ ТА ЗАСОБИ ЇЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ. НАДІЙНІСТЬ ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА ЯКОСТІ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Поняття якості продукції. Роль випробувань і контролю у підвищенні якості.....	10
1.2 Роль стандартизації та сертифікації у підвищенні якості .....	13
1.3 Надійність як складова частина якості.....	14
<b>2 ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЯКІСТЬ РЕЗ.....</b>	<b>18</b>
2.1 Внутрішні фактори.....	19
2.2 Зовнішні фактори .....	19
2.2.1 Механічні ЗВФ.....	20
2.2.2 Кліматичні та термічні ЗВФ.....	22
2.2.3 Біологічні ЗВФ .....	22
2.2.4 Інші види ЗВФ.....	22
2.2.5 Вплив ЗВФ на РЕЗ .....	23
<b>3 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ ВИПРОБУВАНЬ. КЛАСИФІКАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ.....</b>	<b>27</b>
3.1 Основні поняття. Цілі та завдання випробувань .....	27
3.2 Класифікація видів, методів і технології випробувань.....	29
3.2.1 Класифікація випробувань за умовами та місцем, проведення.....	29
3.2.2 Класифікація випробувань за видом дії.....	35
3.2.3 Класифікація випробувань за програмними цілями і призначенням .....	36
3.2.4 Класифікація випробувань на етапі проектування .....	37
3.2.5 Класифікація випробувань готової продукції .....	38
3.2.6 Класифікація випробувань за тривалістю проведення.....	39
3.2.7 Класифікація випробувань за результатом дії на стан виробу .....	39
3.2.8 Класифікація випробувань за характеристикою об'єкта, що визначається .....	40
<b>4 ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДЕЯКИХ ВИДІВ ВИПРОБУВАНЬ .....</b>	<b>42</b>
4.1 Випробування, спрямовані на скорочення часу .....	42
4.1.1 Прискорені випробування.....	42

4.1.2	Випробування на ушкоджуючі навантаження .....	45
4.2	Випробування з використанням моделей .....	48
4.2.1	Статистичні випробування.....	48
4.2.2	Граничні випробування.....	52
4.2.3	Матричні випробування .....	58
5	ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ .....	61
5.1	Програма випробувань .....	61
5.1.1	Розділ 1. Об'єкт випробувань.....	63
5.1.2	Розділ 2. Мета випробувань .....	65
5.1.3	Розділ 3. Обґрунтування необхідності проведення випробувань.....	66
5.1.4	Розділ 4. Місце проведення та забезпечення випробувань .....	66
5.1.5	Розділ 5. Обсяг і методика випробувань.....	67
5.1.6	Розділ 6. Оформлення результатів випробувань.....	68
5.1.7	Загальні вимоги до ПВ .....	68
5.2	Методика випробувань .....	71
5.3	Звітність при проведенні випробувань.....	76
6	ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ.....	77
7	ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА МЕХАНІЧНІ ВПЛИВИ.....	82
7.1	Впливи механічних факторів на РЕЗ.....	82
7.2	Загальна структура і методичні принципи проведення випробувань на механічні впливи .....	84
7.2.1	Структура методики випробувань на механічні впливи .....	86
7.2.2	Вимоги до обладнання для механічних випробувань .....	88
7.2.3	Хід випробувань.....	89
7.3	Випробування на механічний резонанс .....	90
7.3.1	Випробування на визначення резонансних частот конструкції (метод 100).....	90
7.3.2	Випробування на наявність резонансних частот конструкції в заданому діапазоні частот (метод 101) .....	91
7.4	Випробування на вібростійкість (метод 102) .....	93
7.4.1	Випробування на вібростійкість при впливі синусоїдальної вібрації .....	93
7.4.2	Випробування на вібростійкість при впливі широкосмугової випадкової вібрації .....	95
7.5	Випробування на віброміцність (метод 103) .....	95
7.5.1	Випробування методом частоти, що хитається .....	96

7.5.2	Випробування методом фіксованих частот у всьому діапазоні.....	101
7.5.3	Випробування шляхом впливу широкосмугової випадкової вібрації .....	102
7.6	Випробування на ударну міцність і стійкість.....	107
7.6.1	Випробування на ударну міцність (метод 104).....	107
7.6.2	Випробування на ударну стійкість (метод 105).....	109
7.6.3	Випробування на вплив одиночних ударів (метод 106)....	110
7.7	Випробування на вплив лінійного прискорення (метод 107) ..	115
7.8	Випробування на вплив акустичного шуму (метод 108).....	118
7.8.1	Випробування на вплив випадкового акустичного шуму.	118
7.8.2	Випробування на вплив акустичного тону мінливої частоти .....	120
8	<b>ДАТЧИКИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ПРИНЦИПИ ДІЇ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ</b> .....	122
8.1	Перетворювачі механічних навантажень.....	122
8.1.1	Призначення перетворювачів механічних навантажень... ..	122
8.1.2	Класифікація перетворювачів механічних навантажень... ..	122
8.2	Тензометри.....	126
8.2.1	Методи тензометрії.....	126
8.2.2	Тензометричні перетворювачі .....	131
8.3	Вимірювальні віброперетворювачі (ВПП).....	133
8.3.1	Класифікація ВПП .....	133
8.3.2	Основні параметри віброперетворювачів.....	135
8.3.3	Критерії оцінки безконтактних ВВП .....	136
8.3.4	Особливості застосування інерційних ВВП.....	139
8.3.5	Конструкції та особливості роботи ВВП різного принципу дії .....	143
8.4	Обладнання для випробувань на вібраційні впливи .....	169
8.5	Обладнання для випробувань на ударні впливи .....	172
8.6	Обладнання для випробувань на лінійні прискорення .....	174
8.6.1	Принцип дії та структурна схема установок лінійного прискорення.....	175
8.6.2	Класифікація центрифуг та їх основні параметри .....	176
8.6.3	Конструкції центрифуг.....	178
9	<b>ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА КЛІМАТИЧНІ ВПЛИВИ</b> .....	181
9.1	Впливи кліматичних факторів на РЕЗ.....	181
9.1.1	Температурні впливи.....	181

9.1.2 Вплив вологи .....	182
9.1.3 Вплив атмосферного тиску .....	184
9.1.4 Вплив інших кліматичних факторів.....	185
9.2 Загальна структура і методичні принципи проведення випробувань на кліматичні впливи .....	186
9.2.1 Структура методики випробувань РЕЗ на кліматичні впливи .....	186
9.2.2 Особливості проведення випробувань на кліматичні впливи на різних стадіях проектування .....	188
9.2.3 Нормалізована послідовність кліматичних випробувань .	188
9.3 Випробування на температурні впливи .....	190
9.3.1 Випробування на вплив підвищеної температури (методи 201, 202) .....	190
9.3.2 Випробування на знижену температуру (методи 203, 204) .....	193
9.3.3 Випробування на зміну температур (метод 205) .....	195
9.4 Випробування на вплив підвищеної вологості (методи 207, 208) .....	198
9.4.1 Випробування без конденсації вологи - безперервний режим .....	199
9.4.2 Випробування з конденсацією вологи - циклічний режим	200
9.5 Випробування на вплив інею і роси (метод 206) .....	205
9.6 Випробування на вплив соляного туману (метод 215).....	206
9.7 Випробування на зовнішній вплив води (методи 207 - 220)....	209
9.8 Випробування на вплив тиску - атмосферного та гідростатичного .....	212
9.8.1 Випробування на вплив зниженого атмосферного тиску (метод 209).....	212
9.8.2 Випробування на вплив підвищеного атмосферного тиску (метод 210).....	213
9.8.3 Випробування на вплив підвищеного гідростатичного тиску (метод 216).....	215
9.9 Випробування на вплив пилу .....	215
9.9.1 Випробування на вплив статичного пилу (метод 213).....	215
9.9.2 Випробування на вплив динамічного пилу (метод 212) ...	216
9.10 Випробування на вітростійкість .....	218
9.11 Випробування на вплив сонячного випромінювання (метод 211) .....	219

9.12	Випробування на герметичність (метод 401) .....	222
10	<b>ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ТА ПРИНЦИПИ ДІЇ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КЛІМАТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ</b> .....	225
10.1	Обладнання для випробувань на температурні впливи.....	225
10.1.1	Засоби вимірювання температури.....	225
10.1.2	Вимоги до камер для випробувань на температурні впливи .....	232
10.1.3	Принципи дії та конструкції камер для випробувань на температурні впливи.....	233
10.2	Обладнання для випробувань на підвищену вологість .....	236
10.2.1	Засоби вимірювання вологості .....	236
10.2.2	Принципи дії та конструкції камер для випробувань на вплив вологості .....	239
11	<b>ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА БІОЛОГІЧНІ ВПЛИВИ</b> .....	243
11.1	Вплив біологічних факторів на РЕЗ .....	243
11.2	Випробування на вплив цвілевих грибів (метод 214).....	245
11.3	Випробування на стійкість матеріалів до дії комах .....	248
11.4	Випробування на стійкість матеріалів до впливу гризунів ...	248
12	<b>РАДІАЦІЙНІ ТА КОСМІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ</b> .....	250
12.1	Випробування на радіаційні впливи.....	250
12.1.1	Види іонізуючого випромінювання .....	250
12.1.2	Вплив радіаційного випромінювання на працездатність РЕЗ.....	252
12.1.3	Засоби вимірювань радіаційного випромінювання .....	253
12.1.4	Особливості випробувань на радіаційні впливи .....	254
12.2	Спеціальні космічні випробування.....	256
12.2.1	Випробування на забезпечення теплового режиму РЕЗ .	256
12.2.2	Випробування на роботу РЕЗ в умовах невагомості .....	258
12.2.3	Випробування на вплив потоків твердих частинок, сонячного вітру та різних видів випромінювання .....	259
12.2.4	Комплексні космічні випробування .....	259
13	<b>АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ РЕЗ</b> .....	261
13.1	Система Nastran .....	261
13.2	Система ANSYS .....	262
13.3	Система T-FLEX.....	262
13.4	Система Pro/ENGINEER.....	263
13.5	Система АСОНІКА .....	264
13.6	Система SolidWorks .....	264

13.7 Загальні висновки щодо можливостей застосування САПР при випробуваннях РЕЗ .....	266
ЛІТЕРАТУРА .....	268
Додаток А. Титульний аркуш ПВ .....	271
Додаток Б. Приклад оформлення ПВ (об'єкт випробувань: засіб вимірювання) .....	272
Додаток В. Протокол випробувань .....	279
Додаток Г. Зведена відомість відмов .....	280

## 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 рекламацій і висновків споживача про якість готових виробів.

Випробування РЕЗ є одним з елементів процесу контролю з метою визначення технічних показників виробів РЕЗ за допомогою різних засобів. До цих показників відносяться різні технічні параметри, надійність, безвідмовність, довговічність, ремонтопридатність, збереженість та ін.

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

# **1 ЯКІСТЬ ТА ЗАСОБИ ЇЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ. НАДІЙНІСТЬ ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА ЯКОСТІ**

## **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 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 та ін.

Серед вимог до якості РЕЗ зазвичай прийнято виділяти технічні (функціональні) і економічні показники, надійність, рівень уніфікації. Це дійсно важливі показники, однак усі їх 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, а також у багатьох сферах застосування і тривалої експлуатації РЕЗ показує, що успішне вирішення проблеми забезпечення високої якості виробів неможливе шляхом проведення розрізаних 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.ін.

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 конкретно виробів розглядається. Для одних вирішальне значення гратимуть такі технічні характеристики, як надійність, довговічність і т.ін., 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.ін. 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, мікро- і нанотехніки, пристроїв точної механіки, мікроелектромеханіки і приладобудування, систем і пристроїв відображення інформації та управління і т.ін., 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.ін.

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

## 1.2 Роль стандартизації та сертифікації у підвищенні якості

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 Надійність як складова частина якості

Складовою частиною якості є надійність, в поняття якої включаються деякі властивості, що визначають якість. Під надійністю прийнято розуміти сукупність властивостей, що забезпечують безвідмовність, ремонтпридатність і довговічність РЕЗ.

**Безвідмовність** - властивість системи зберігати працездатність протягом заданого часу в певних умовах експлуатації. Це поняття тісно пов'язане з іншим найважливішим поняттям теорії надійності - **відмовою**, що визначає повну або часткову втрату працездатності.

Більш широким поняттям, ніж відмова, можна вважати несправність. Під **несправністю** розуміють такий стан РЕЗ, при якому хоча б один його основний параметр не відповідає встановленому експлуатаційному допуску (основна несправність), або коли має місце погіршення або порушення другорядних параметрів, таких як зручність експлуатації, зовнішній вигляд тощо (другорядна несправність або дефект). Слід зазначити, що відмова є наслідком тільки основний несправності.

Пристосованість системи до попередження, виявлення та усунення відмов характеризується **ремонтпридатністю**. Кількісно ремонтпридатність оцінюється витратами часу і коштів на діагностику відмов з урахуванням необхідної кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Відновлювані та невідновлювані системи і елементи не можуть експлуатуватися нескінченно довго. З плином часу відбувається знос і старіння елементів і систем, що призводить до відмов.

Для відновлюваних елементів сумарне напрацювання від початку експлуатації (випробувань) до моменту виникнення відмови, обумовленої основною несправністю, прийнято називати **довговічністю**. Довговічність відновлюваних систем залежить від

довговічності елементів, що входять до неї, технології виготовлення та умов експлуатації.

Довговічність відновлюваних систем тим вище, чим вища довговічність невідновлювальних елементів, що входять до неї. При цьому відновлювані системи можуть мати велику кількість відмов за час експлуатації, для усунення яких здійснюють ремонт РЕЗ, який супроводжується заміною елементів, що відмовили, новими.

Сумарне напрацювання відновлюваних систем (елементів) від початку експлуатації до її припинення, обумовлене зношуванням і (або) старінням, називається *технічним ресурсом*. Сумарне напрацювання, що характеризує технічний ресурс, менше сумарного напрацювання, що характеризує довговічність. Прийнято вважати, що ремонт РЕЗ, які витратили свій технічний ресурс, економічно недоцільний.

Крім понять довговічності і технічного ресурсу, які характеризують надійність РЕЗ, існує таке поняття, як *гарантійний термін служби*, що встановлює взаємини між замовником і постачальником. Гарантійний термін служби завжди менше довговічності і технічного ресурсу. Якщо протягом гарантійного терміну служби відбувається відмова, то юридичну відповідальність за це несе постачальник, який повинен виконати ремонт виробу, що відмовив, а в разі неможливості ремонту, замінити його справним.

Для кількісної оцінки розглянутих властивостей надійності користуються рядом параметрів і імовірнісними характеристиками, отриманими на підставі збору статистичних даних про відмови.

З метою правильного групування статистичних даних про відмови, однозначності їх визначення і зручності аналізу відмови класифікують по ряду ознак.

Всі види відмов в залежності від характеру зміни вихідних параметрів РЕЗ (елементів) в часі до моменту виникнення відмови можна поділити на *поступові* і *раптові*.

*Поступові* відмови виникають в результаті поступової, а *раптові* - стрибкоподібної зміни одного або декількох основних параметрів системи.

При поступових відмовах зміна параметрів під час експлуатації або зберігання відбувається відносно повільно, що дозволяє прогнозувати відмови.

При раптових відмовах зміни властивостей елементів і апаратів відбуваються швидко, що виключає можливість їх попереднього виявлення.

Причинами виникнення відмов можуть бути: помилки конструктора і недосконалість методів конструювання (*конструкційні відмови*); порушення встановленого технологічного процесу виробництва або його недосконалість (*технологічні відмови*); зовнішні впливи, що перевищують встановлену для даної апаратури норму, а також порушення правил експлуатації (*експлуатаційні відмови*).

Відмови, що виникають по кожній із зазначених вище причин, можна вважати *незалежними*, на відміну від *залежних*, причиною яких є відмови, що виникли раніше.

Відмови можуть виникати *при випробуваннях РЕА, в період підробітки, під час нормальної експлуатації і на останньому її періоді*.

За наявності зовнішніх проявів відмови можуть бути *явними* і *неявними*. Перші зазвичай легко виявляються при зовнішньому огляді або при включенні апаратури, в той час як для виявлення других потрібно витратити багато часу і проводити спеціальні вимірювання.

Залежно від можливості подальшого використання РЕА після виникнення відмов розрізняють *повні* відмови, до усунення яких використання апаратури виявляється неможливим, і *часткові*, що призводять до часткового погіршення працездатності.

На відміну від *стійких* відмов, що усуваються в процесі ремонту, іноді виникають відмови, які *самоусуваються*. Тривалість дії таких відмов мала (одиниці і частки секунди) в порівнянні з тривалістю роботи до наступної відмови. Ці відмови називають *збоями*. Причинами збоїв можуть бути дії різних перешкод і внутрішні шуми. Ряд збоїв, що швидко наступають один за одним, викликають відмову, яка перемижується. Прикладами таких відмов можуть бути іскріння і пробої, що виникають у високовольтній апаратурі під дією вологи або іонізуючих факторів.

Для забезпечення заданої надійності РЕЗ та її елементи піддають контролю або випробуванням на етапах конструювання, виробництва та експлуатації.

**Контроль** - процес встановлення відповідності між станом об'єкта контролю і заданої нормою шляхом сприйняття контрольованих параметрів і видачі судження про результат.

**Випробування** - процес визначення параметрів РЕЗ (елементів) за встановленою методикою з метою оцінки їх відповідності вимогам технічних умов (ТУ).

Контроль відрізняється від процесу випробування тим, що він може бути як спеціально передбачений, так і проводиться в разі потреби в період відпрацювання схеми, в ході технологічного процесу виробництва і під час експлуатації. При цьому РЕЗ та їх елементи знаходяться в нічим не зумовлених умовах навколишнього середовища. Найчастіше вони бувають близькими до нормальних умов експлуатації. Зазвичай в процесі контролю параметри навколишнього середовища не контролюються. Найбільш широко застосовується контроль в процесі виробництва. Одним із завдань здійснення контролю є необхідність виявлення причин виникнення несправностей.

Проведення випробувань строго регламентовано по періодичності, обсягу, умовам їх здійснення та багатьом іншим показникам.

Розрізняють випробування **на функціонування, на вплив навколишнього середовища і на надійність**.

Різниця зазначених видів випробувань полягає в тому, що при випробуваннях на функціонування визначають задані параметри виробу при роботі протягом короткого інтервалу часу в певних умовах; при випробуваннях на вплив навколишнього середовища визначають параметри при екстремальних характеристиках кліматичних умов і механічних впливів; при випробуваннях на надійність визначають значення параметрів надійності за встановленою методикою при роботі виробу в заданому інтервалі часу, в певних умовах, з метою оцінки їх відповідності вимогам ТУ.

Найважливішою вимогою до проведення будь-яких із зазначених випробувань є забезпечення суворого відповідності умов навколишнього середовища заданим.

## 2 ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЯКІСТЬ РЕЗ

Забезпечення високої якості і надійності РЕЗ вимагає знання і аналізу факторів, від яких вони залежать.

Необхідно не тільки отримувати статистичні дані про відмови, а й аналізувати причини їх виникнення, оцінювати запаси міцності і стійкості систем, їх здатність до нормального функціонування при окремих помилках обслуговуючого персоналу, а також при різних зовнішніх впливах. При цьому слід дослідити фізико-хімічні процеси, що відбуваються як в елементах, так і в системі в цілому на всіх стадіях виробництва і експлуатації РЕЗ. Джерелами необхідної інформації для оцінки надійності є реальна експлуатація і випробування РЕЗ (елементів).

Розгляд факторів, що визначають надійність РЕЗ, дозволяє правильно організувати контроль і випробування на етапах конструювання, виробництва та експлуатації.

На етапі конструювання над розробкою РЕЗ працює колектив, і помилки одного виконавця надають відносно слабкий вплив на прийняття остаточного рішення, оскільки вони можуть бути усунені іншими.

На етапі виробництва здійснення контролю і випробування готових РЕЗ дозволяють підвищити надійність. При цьому підвищенню надійності сприяє застосування засобів автоматизації, що зменшують вплив людини, підвищення кваліфікації робітників та інженерно-технічного персоналу, а також поліпшення умов праці.

На етапі експлуатації надійність РЕЗ залежить від впливу *суб'єктивних* та *об'єктивних* факторів.

До *суб'єктивних факторів* відносять роботу обслуговуючого персоналу, з вини якого, як показує статистика, відбувається 20-30% відмов.

До *об'єктивних* відносять фактори, які можна поділити на *зовнішні*, що призводять до відмов з причин, не залежних від самої апаратури, і *внутрішні*, залежні від особливостей роботи апаратури і елементів, що входять до неї.

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.

## 2.1 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 викликають 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.

## 2.2 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 знижений 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 2.1.

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

- впливи 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.

### 2.2.1 Механічні ЗВФ

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

До механічних *факторів статичного впливу* відносяться:

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

До механічних *факторів динамічного впливу* відносяться:

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

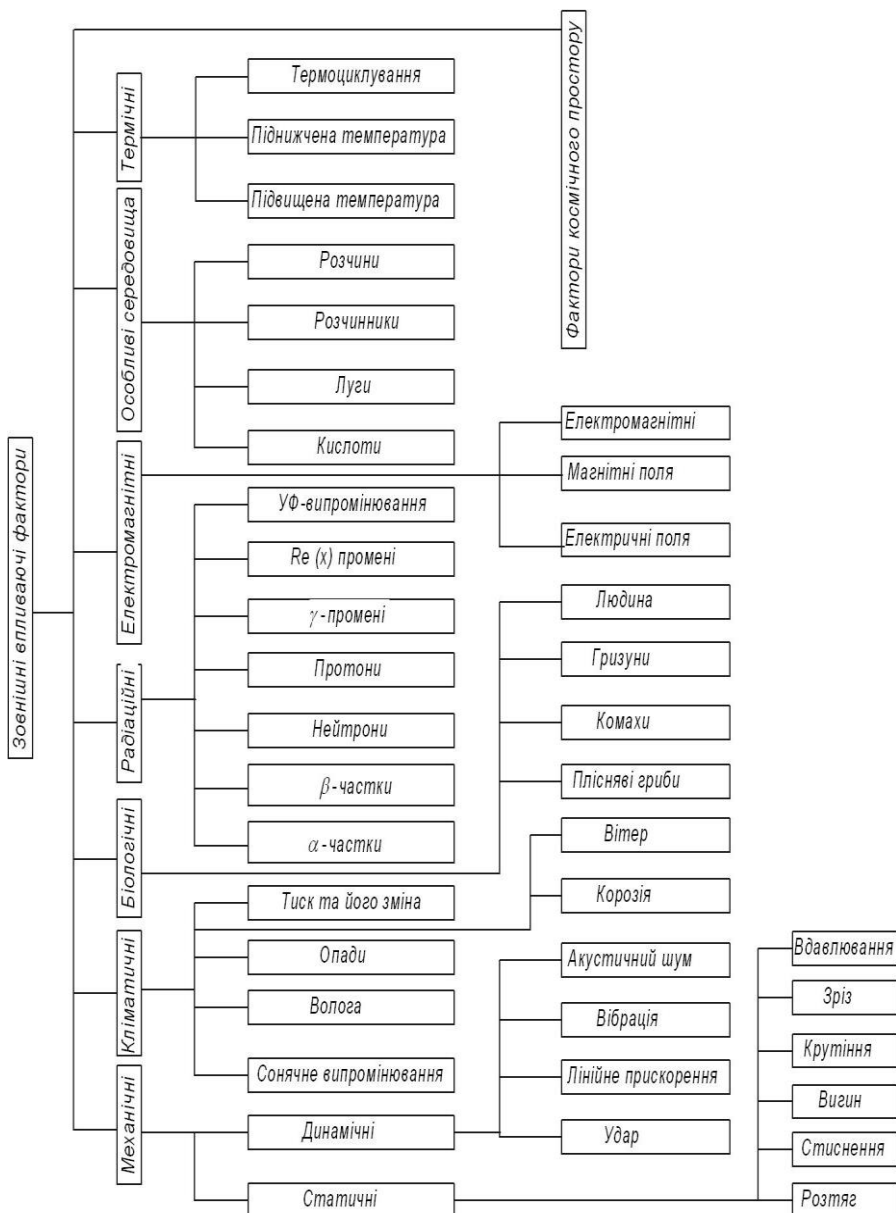


Рисунок 2.1 - Класифікація ЗВФ

## 2.2.2 Кліматичні та термічні ЗВФ

Серед *кліматичних факторів* зазвичай виділяють впливи:

- сонячного випромінювання (в приповерхневих шарах атмосфери);
- вологи, що міститься в повітрі або будь-якій іншій 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 та ін.);
- 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, а також її періодичні (термоцикування) і неперіодичні зміни.

## 2.2.3 Біологічні ЗВФ

Серед *біологічних факторів* зазвичай виділяють впливи:

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

Іноді у якості біологічного фактору впливу зовнішнього середовища можуть виступати і плазуни або вищі тварини, але ймовірність такої ситуації набагато нижча, 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.

## 2.2.4 Інші види ЗВФ

До радіаційних факторів відносять сукупність іонізуючих випромінювань, з якими технічна система може зіткнутися при своїй нормальній експлуатації. Це потоки  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинок, протонів і

нейтронів;  $\gamma$ - Re- 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.

### 2.2.5 Вплив ЗВФ на РЕЗ

Зовнішні і внутрішні фактори перш за все впливають 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 виробі 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.).

Зміни параметрів та характеристик можуть бути **незворотні і зворотні**.

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

До **зворотних змін** відносяться такі, як відновлення властивостей матеріалу, що адсорбував газу або вологу своєю

поверхнею; відновлення властивостей, значень параметрів і характеристик виробів після припинення температурних впливів та ін.

Практика показує, що під час експлуатації на виробі діє одночасно цілий комплекс механічних, кліматичних, біологічних та інших факторів, і їх сукупність можна характеризувати як умови експлуатації.

**Умови експлуатації** - сукупність зовнішніх і внутрішніх факторів, які впливають на функціонування та працездатність виробів.

За діапазоном та ступенем впливу факторів умови експлуатації поділяються на нормальні, робочі та граничні.

**Нормальні (нормальні кліматичні) умови** (НКУ) - значення сукупності факторів, установлених НТД, як номінальні; у таких умовах похибки приладів можуть бути визначені й гарантуватися. Ці умови є базою, відносно якої виявляються зміни властивостей виробу в інших умовах.

**Параметри НКУ:**

- температура  $+25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ;
- атмосферний тиск 86...104 кПа (650...808 мм рт. ст.);
- відносна вологість  $65 \pm 15\%$ .

**Робочі умови** - сукупність факторів, межі яких нормують характеристики показників якості виробів, зазначених у ТУ та іншій НТД.

**Граничні умови** характеризують екстремальні значення факторів, при дії яких виробу витримують навантаження без руйнування й погіршення якості.

Слід зазначити, що одночасна дія декількох ЗВФ може як підсилувати, так і зменшувати їх сумісний вплив. У табл. 2.1 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 є 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 2.1 - Можливі наслідки одночасного впливу найбільш розповсюджених ЗВФ

ЗВФ, що впливають одночасно	Можливі наслідки впливу
1	2
<p><b>Підвищена температура</b> та: підвищена вологість, сонячна радіація, низький атмосферний тиск, соляний туман, вібрація, звуковий тиск, удар, іонізовані гази.</p> <p><b>Знижена температура</b> та: підвищена вологість, вібрація, удар.</p> <p><b>Підвищена вологість</b> та: низький атмосферний тиск, забруднення повітря.</p> <p><b>Туман</b> та забруднення повітря.</p> <p><b>Сонячна радіація</b> та: вітер, соляний туман, вібрація, іонізовані гази.</p> <p><b>Вітер</b> та соляний туман.</p> <p><b>Удар</b> та звуковий тиск.</p>	Механічне зношення
<p><b>Туман</b> та дощ.</p>	Погіршення працездатності
<p><b>Знижена температура</b> та вітер.</p> <p><b>Дощ</b> та вітер.</p> <p><b>Вітер</b>, пил та пісок.</p>	Механічне зношення та погіршення працездатності
<p><b>Підвищена вологість</b>, дощ та туман.</p> <p><b>Грибоутворення</b> та: підвищена температура, підвищена вологість, дощ, соляний туман.</p> <p><b>Забруднення повітря</b> та: дощ, вітер.</p> <p><b>Низький атмосферний тиск</b> та іонізовані гази.</p> <p><b>Космічна</b> та сонячна радіація.</p>	Взаємне підсилення дії
<p><b>Підвищена температура</b>, туман, пил, пісок.</p> <p><b>Знижена температура</b> та: дощ, сонячна радіація, грибоутворення, пил, пісок, соляний туман, звуковий тиск, іонізовані гази.</p> <p><b>Підвищена вологість</b> та: сонячна радіація, пил, пісок, вібрація.</p> <p><b>Дощ</b> та соляний туман.</p> <p><b>Сонячна радіація</b> та: грибоутворення, пил, пісок, низький атмосферний тиск.</p> <p><b>Грибоутворення</b> та іонізовані гази.</p> <p><b>Низький атмосферний тиск</b>, вібрації, удари.</p> <p><b>Вітер</b> та звуковий тиск.</p>	Взаємне послаблення дії

## **3 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ ВИПРОБУВАНЬ. КЛАСИФІКАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ**

### **3.1 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:**

3.1.1 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.

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

3.1.3 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.ін. 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.

## **3.2 Класифікація видів, методів і технології 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. 3.1. Вид випробувань, що характеризується організаційною ознакою їх проведення та прийняттям рішень за результатами оцінки обладнання в цілому, є категорією випробувань. На рис. 3.1 представлені 9 категорій випробувань; кожна категорія характеризує випробування за певними ознаками їх проведення.

### **3.2.1 Класифікація випробувань за умовами та місцем, проведення**

У стандарті [9] охарактеризовано 62 види випробувань.

Зазначено, що усі 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 наведені у табл. 3.1.

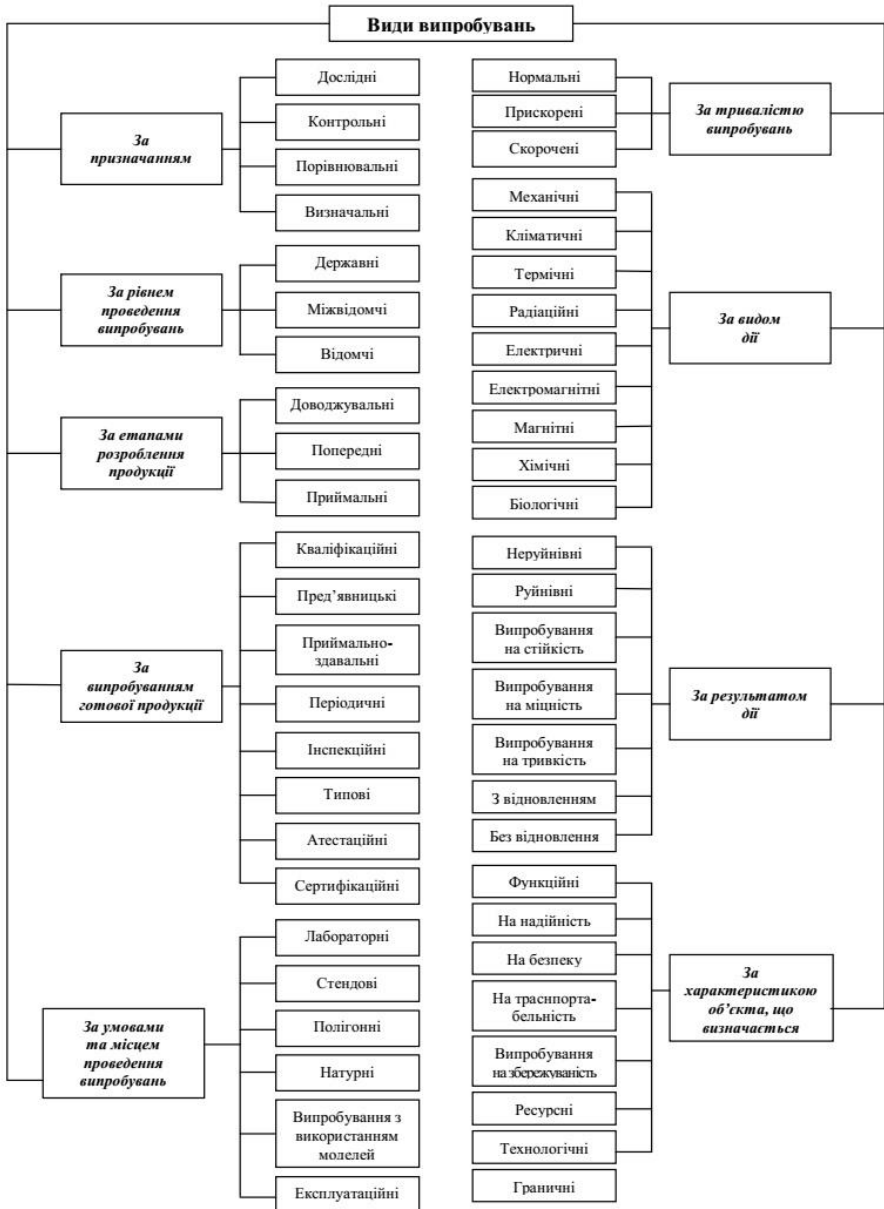


Рисунок 3.1 - Класифікація випробувань

Таблиця 3.1 - 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: <ul style="list-style-type: none"> <li>• випробуванням підлягає безпосередньо виготовлений виріб без застосування моделей або складових частин апаратури;</li> <li>• випробування проводяться в умовах і при впливах на вироби факторів, відповідних до умов і впливів при їх використанні за цільовим призначенням;</li> <li>• 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).</li> </ul>
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 бортової 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 факторів.

Залежно від величини навантаження, що впливає на РЕЗ, розрізняють три види лабораторних випробувань: **на термін служби, прискорені і на ушкоджуючі навантаження.**

**Випробування на термін служби** за тривалістю близькі до експлуатаційних. Але на апаратуру при цьому впливає не випадкове, а певне навантаження.

Недоліками цих випробувань є необхідність наявності зразків або макетів РЕЗ, великі витрати часу, а також необхідність використання спеціального дорогого випробувального устаткування.

Для зменшення часу випробувань використовують прискорені випробування та випробування на ушкоджуючі навантаження.

При *прискорених випробуваннях* діюче навантаження значно більше експлуатаційного, що призводить РЕЗ до швидкого виходу з ладу.

*Випробування на ушкоджуючі навантаження* полягають в тому, що РЕЗ піддається впливу одного або ряду зростаючих навантажень, що призводять до появи відмови.

На відміну від випробувань на термін служби ці методи дозволяють значно скоротити час випробувань. Більш детально вони будуть розглянуті у розділі 4.

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 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 межі.

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**.

Розвитком граничних випробувань є **матричні випробування**, при яких визначається надійність пристрою в залежності від спільних змін значень первинних параметрів в межах встановлених допусків.

Математичне моделювання процесу експлуатації з використанням комп'ютерної техніки дозволяє скоротити час, випробувань і виключити необхідність багаторазового їх повторення.

Для здійснення математичного моделювання необхідна вхідна інформація, одержувана в процесі реальної експлуатації, в результаті випробувань, а також шляхом теоретичних і аналітичних досліджень.

Складність побудови математичної моделі і визначення необхідної інформації поки обмежує широке застосування цього методу.

При виборі методу випробувань РЕЗ слід виходити з необхідного ступеня достовірності результатів, а також з економічних міркувань.

Деякі види випробувань з використанням моделей будуть розглянуті більш детально у розділі 4.

### 3.2.2 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.

### **3.2.3 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.

### 3.2.4 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.

### 3.2.5 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-виготівника 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 вибірковому 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.

### **3.2.6 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.

### **3.2.7 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.

### 3.2.8 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.

**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.

## 4 ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДЕЯКИХ ВИДІВ ВИПРОБУВАНЬ

### 4.1 Випробування, спрямовані на скорочення часу

Одним з основних недоліків лабораторних та стендових випробувань є досить великі витрати часу на їх проведення. Щоб уникнути цього недоліку, проводять спеціальні види випробувань, до яких відносяться прискорені, скорочені випробування та випробування на ушкодуючі навантаження.

#### 4.1.1 Прискорені випробування

Метою *прискорених випробувань* є виявити зміни електричних, механічних та інших параметрів РЕЗ (елементів і матеріалів) при скороченні тривалості випробувань і одночасному посиленні умов експлуатації, а також при форсуванні режимів роботи РЕЗ. Здійснення більш жорстких умов експлуатації може досягатися шляхом збільшення температури ( $t$ , °C), відносної вологості ( $r$ , %), механічних та інших впливів.

Форсування режимів роботи РЕЗ (елементів) досягається шляхом підвищення напруги живлення або збільшення електричного навантаження. При випробуваннях апаратури, що працює в циклічному режимі, для його форсування зменшують час пауз, збільшують частоту і кількість включень.

Вплив перерахованих вище факторів призводить до збільшення інтенсивності відмов. В результаті прискорених випробувань виявляється можливим отримати функціональну залежність інтенсивності відмов ( $\lambda$ ) від зовнішніх впливів ( $t$  °,  $r\%$ ,  $p$ , мм рт.ст. тощо).

Основні труднощі проведення прискорених випробувань полягають в необхідності встановлення відповідності законів розподілу відмов при прискорених випробуваннях з законами нормальної експлуатації. При цьому необхідно, щоб інтенсифікація процесів старіння і вироблення ресурсу не приводила до збільшення навантажень понад встановлених допусків, при яких можуть виникати відмови і поломки.

Вибір форсованих режимів прискорених випробувань ґрунтується на результатах теоретичного і фізико-хімічного аналізу даних про роботу РЕЗ та їх елементів. Одним із шляхів отримання необхідних даних є збір і аналіз статистичного матеріалу, що дозволяє встановити закони розподілу різного виду відмов, виявити причини їх виникнення та встановити подібність цих законів як для РЕЗ, так і для їх елементів. Наявність зазначеної інформації дозволяє вирішити питання про можливість прискорення фізико-хімічних процесів, що відбуваються в РЕЗ (елементах) при проведенні випробувань.

Перед початком випробувань необхідно проаналізувати умови експлуатації, зберігання і транспортування РЕЗ, встановити можливі навантаження на РЕЗ (збільшення напруги живлення, кількість включень, тривалість роботи тощо), а також інтенсивність впливу окремих факторів (температура, вологість, вібрація та інше).

**На першому етапі випробувань** вибираються ЗВФ, які найбільш прискорюють знос виробу.

При виборі ЗВФ і меж їх зміни необхідно виходити з можливості максимального прискорення фізико-хімічних процесів, що відбуваються в апаратурі і елементах при експлуатації, уникаючи появи побічних процесів, що спотворюють картину зносу і старіння.

Рекомендується вибирати один або два фактори, при дії яких здійснюють прискорені випробування.

При необхідності проведення випробувань на вплив декількох факторів виробу розбивають на декілька груп, кожна з яких випробується на дію одного або двох факторів при незмінних інших. Слід мати на увазі, що під час дії будь-якого одного фактора в різнорідних елементах РЕЗ можуть виникати різні процеси, що протікають з різними швидкостями. Тому необхідно враховувати, які саме фізико-хімічні процеси протікають в елементах РЕЗ і якою може бути залежність інтенсивності відмов від швидкості цих процесів.

**На другому етапі випробувань** РЕЗ (елементи) випробують на вплив обраних факторів. За результатами випробувань визначають режим і обсяг прискорених випробувань, час напрацювання на відмову і інші параметри надійності.

**На третьому етапі випробувань**, користуючись отриманими даними, розробляють методику прискорених випробувань, відповідно до якої здійснюють випробування інших екземплярів або партій аналогічних РЕЗ та елементів.

За результатами випробувань для кожного фактора знаходиться розподіл частоти відмов, математичне сподівання та дисперсія із зазначенням довірчого інтервалу при заданому рівні достовірності. За отриманими даними виводяться аналітичні залежності і будується графік функції параметра розподілу від фактору, що впливає.

Після цього параметри прискорених випробувань перераховують для умов нормальної експлуатації. В ході перерахунку визначають коефіцієнти, які зв'язують час звичайних і прискорених випробувань.

Одним з таких коефіцієнтів є *коефіцієнт прискорених випробувань  $K_{\Pi}$* :

$$K_{\Pi} = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{п}}} = \frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{н}}}$$

де:  $t_{\text{н}}$ ,  $t_{\text{п}}$  - час випробувань у нормальному та прискореному режимах відповідно;

$\lambda_{\text{н}}$ ,  $\lambda_{\text{п}}$  - інтенсивності відмов у нормальному та прискореному режимах відповідно.

Запропонована послідовність робіт справедлива при проведенні випробувань будь-яких елементів і РЕЗ.

Задавши рівень достовірності, відносну (абсолютну) похибку, передбачуваний термін служби, режим випробувань, а також користуючись отриманими графічною і аналітичною (емпіричною) залежностями, визначають обсяг випробувань і ступінь прискорення. Обсяг випробування істотно залежить від передбачуваного терміну служби РЕЗ.

Як показує практика, за раціонально розробленою методикою прискорених випробувань можливе скорочення часу випробувань в 2...4 рази. Але недоліком розглянутої програми є тривалість попередньої підготовки до проведення прискорених випробувань.

У табл. 4.1 наведені параметри ЗВФ при проведенні деяких випробувань у нормальному та прискореному режимах.

Таблиця 4.1 - Умови нормальних та прискорених випробувань РЕЗ

Ввипробування	Параметр	Режим		Додаткові умови
		норм.	прискор.	
1	2	3	4	5
Вібростійкість	Діапазон частот, Гц	20...50000	20...200000	За програмою випробувань
	Прискорення, м/с <sup>2</sup>	100	400	
	Тривалість, год.	1...8	0,1...2,0	
Віброміцність: МХЧ * МФЧ **	Кількість циклів	72...240	18...60	
	Тривалість, год.	6...48	1,5...6,0	
	Тривалість, год.	1...6	0,1...1,5	
Ударна міцність (поодинокій удар)	Прискорення, м/с <sup>2</sup>	40...10000	60...30000	
	Тривалість, мс	60,0...0,2	40,0...0,05	
	Кількість ударів	5000...400	3000...200	
Ударна міцність (багатократний удар)	Прискорення, м/с <sup>2</sup>	40...1000	400...2000	
	Тривалість, мс	15...2	10...1	
	Кількість ударів	10000...40000	12000...5000	
Теплостійкість	Температура, °С	20...70	40...105	В залежн. від маси та ступеню жорсткості
	Тривалість, год.	2...4	0,5...2,0	
Вологостійкість	Кількість циклів	4...12	4...18	
	Температура, °С	40 <sub>+2</sub>	55 <sub>+2</sub>	
	Відн. вологість, %	65 <sub>+15</sub>	95 <sub>+3</sub>	
	Тривалість, діб	4...56	4...14	
Зміна напруги мережі	Температура, °С	25 <sub>+10</sub>	40 <sub>+2</sub>	У робочому режимі
	Напруга, В	U <sub>н</sub>	(1,1...1,2) U <sub>н</sub>	
	Тривалість, год.	24...48	4...10	

#### 4.1.2 Випробування на ушкоджуючі навантаження

Метою *випробувань на ушкоджуючі навантаження* є оцінити стійкість елементів (деталей і вузлів), а іноді і самих РЕЗ до зовнішніх впливів. Оскільки в ході випробувань виявляються «слабкі» елементи з прихованими дефектами, то іноді ці випробування називають «пошуком критичної слабкості».

При цьому методі випробувань навантаження (зовнішній вплив) збільшується поступово до моменту виникнення відмови

елемента (РЕЗ). Величина навантаження фіксується як в процесі його збільшення, так і в момент відмови.

Іноді, при наявності великого запасу надійності, елементи і РЕЗ витримують навантаження, які у багато разів перевищують максимальні, що мають місце при реальній експлуатації. Емпірично встановлено, що випробування слід припинити після того, як РЕЗ витримає чотириразове перевищення максимально допустимого значення навантаження.

У ряді випадків виникнення відмови не призводить до остаточного виходу з ладу елемента РЕЗ та він після зняття навантаження і усунення відмови виявляється знову працездатним.

Основна відміна випробувань на ушкоджуючі навантаження від випробувань на термін служби полягає в їх різній тривалості.

При випробуваннях на ушкоджуючі навантаження час безвідмовної роботи не фіксується і не досліджується. Щоб усунути побічний вплив тривалості часу випробувань, його намагаються скорочувати.

Випробуванням на ушкоджуючі навантаження найчастіше піддають елементи (РЕЗ) короткочасної і одноразової дії, оскільки вони працюють в жорсткіших режимах.

Випробування на ушкоджуючі навантаження дозволяють отримати відомості про можливості використання елементів (РЕЗ) при певному навантаженні, але за їх результатами можна також визначити характеристики надійності.

При випробуваннях вузлів і РЕЗ слід впевнитися, що деталі, які в них використовуються, мають необхідну надійність. Можливість виникнення прихованих дефектів в деталях через їхню недосконалість маскує і ускладнює аналіз причин виникнення відмов.

Елементи і РЕЗ можуть проходити випробування на одиночні і комплексні навантаження. Чим більша кількість навантажень діє одночасно, тим умови випробування ближчі до експлуатаційних. Однак ушкоджуюче навантаження вибирається тільки одне, та діє воно одночасно з іншими навантаженнями нормального рівня.

Для зручності фіксації інтенсивності навантажень і параметрів елементів (РЕЗ), а також з метою забезпечення часу встановлення стаціонарного режиму ушкоджуюче навантаження збільшується стрибкоподібно з витримкою після кожного стрибка. Величина

витримки ( $\Delta t$ ) залежить від характеру навантаження, величина стрибка навантаження ( $\Delta x$ ) встановлюється експериментально.

Для прискорення процесу випробувань величину стрибка доцільно брати досить великою, проте при цьому зростає ймовірність збільшення помилки при визначенні величини ушкоджуючого навантаження.

Користуючись даними випробувань, будують гістограму розподілу ушкоджуючого навантаження (див. рис. 4.1).

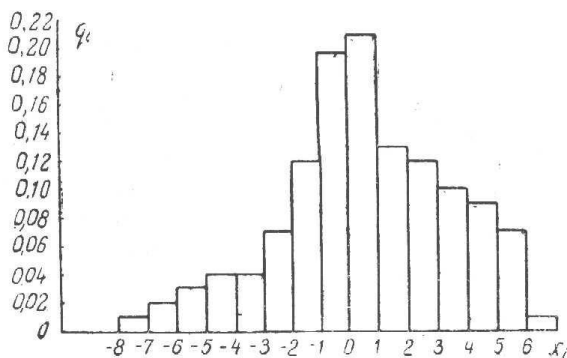


Рисунок 4.1 - Гістограма розподілу ушкоджуючого навантаження

При цьому по осі абсцис відкладають інтервали (розряди) величин, що спостерігається ( $x_i \dots x_{i+1}$ ), а по осі ординат - ймовірність відмов елементів (частоту відмов) у даному інтервалі  $q_i$ .

За початок відліку приймають значення навантаження, при якому  $q_i$  максимальна. Праворуч та ліворуч від даного значення відкладають розряди більших та менших за значенням навантажень, при яких імовірність відмови зменшується.

Повна площа побудованої гістограми дорівнює одиниці. При збільшенні кількості інтервалів (стрибків) розряди стають дрібніше і гістограма наближається до кривої, що обмежує площу, рівну одиниці. Ця крива, що являє собою графік щільності розподілу величини  $x$ , називається кривою розподілу.

Як показує досвід, ушкоджуючі навантаження найчастіше розподілені за нормальним законом. Знання закону розподілу дозволяє приблизно вказати інтервал практично можливих значень випадкових навантажень (правило трьох сигм).

Маючи статистичні дані величини ушкоджуючого навантаження і криву розподілу, обчислюють параметри закону розподілу: середню ушкоджуючого навантаження (математичне очікування) та його середнє квадратичне сподівання. Ці параметри дозволяють оцінити деяке середнє значення ушкоджуючого навантаження та ступінь розсіювання випадкових величин навколо нього.

## 4.2 Випробування з використанням моделей

### 4.2.1 Статистичні випробування

Ці види випробувань включають декілька різновидів. Розглянемо два найбільш часто застосовуваних: метод Монте-Карло та метод статистичних випробувань фізичним моделюванням.

#### 4.2.1.1 Метод Монте-Карло

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

Даний метод дозволяє визначити характеристики надійності виходячи з припущення, що відомий механізм утворення відмов при різних поєднаннях значень параметрів РЕЗ, які обирають випадковим чином відповідно до заданої статистичної моделі. Застосування цього методу дозволяє шляхом багаторазового моделювання випадкового процесу визначити шукану величину.

Для знаходження цього рішення необхідне знання граничних параметрів елементів, що визначають межі працездатності (А) РЕЗ.

Статистичним випробувань можуть піддаватися як математичні, так і фізичні моделі РЕЗ.

Метод статистичного випробування математичної моделі базується на знанні рівнянь, що зв'язують вхідні параметри

$(x_1, x_2, \dots, x_n)$  з вихідними параметрами пристрою, що випробовується  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ . Ці рівняння можуть бути виведені на підставі вивчення конкретного виробу РЕЗ та його внутрішніх функціональних зв'язків, після чого здійснюють формалізацію (математичний опис встановлених зв'язків з урахуванням впливу різних факторів).

Формалізація полягає в складанні математичних залежностей, які визначаються структурами елементів (РЕЗ) і характером їх функціонування. При цьому необхідно правильно вибрати основні фактори, що впливають на функціонування РЕЗ. Збільшення кількості факторів, що враховуються, призводить до ускладнення моделювання.

Вибравши параметри  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , що характеризують процеси функціонування системи і необхідні для оцінки її ефективності, і вважаючи, що працездатність РЕЗ визначається набором параметрів  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , будується модель процесу, яка визначає ймовірність попадання параметра  $y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ , де  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$  - випадкові величини, які мають заданий розподіл в області працездатності А.

Далі розробляються алгоритми, що моделюють процеси функціонування РЕЗ.

В даному випадку алгоритми функцій повинні забезпечувати отримання спільного розподілу при відомих розподілах випадкових чисел  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , які можуть бути взяті зі спеціальних таблиць або отримані за допомогою спеціальних датчиків. Таким чином, вихідний параметр, що характеризує працездатність РЕЗ, виявляється функцією випадкових чисел:  $y = y(a_1, a_2, \dots, a_n)$ .

Далі здійснюється N незалежних реалізацій (випробувань) послідовності випадкових чисел  $a_1, a_2, \dots, a_n$  :

$$\begin{aligned} & a_1^{(1)}, \dots, a_m^{(1)} \\ & a_2^{(2)}, \dots, a_m^{(2)} \\ & \dots \\ & a_n^{(N)}, \dots, a_m^{(N)} \end{aligned}$$

Після цього для кожної з них розраховується значення  $y_i = y(a_1^{(i)}, \dots, a_m^{(i)})$ .

За результатами  $N$  випробувань оцінюють ймовірність попадання параметра у в область  $A$ .

Якщо кількість попадань у область  $A$  дорівнює  $K$ , то:

$$P(A) = \frac{K}{N}$$

Якщо значення випадкових величин мають розподіл за нормальним законом, то похибка, що дається методом Монте-Карло, дорівнює:

$$\delta = \frac{3\sigma}{\sqrt{N}}$$

де:  $\sigma$  - середнє квадратичне відхилення.

Підвищення точності результатів випробувань досягається збільшенням кількості випробувань ( $N$ ).

Даний метод дозволяє використовувати як завгодно складну математичну модель пристрою, що випробовується, та досить повно відображає фізику його роботи і зменшує похибки, властиві розрахунковим методам. Математична модель може являти собою систему часткових аналітичних залежностей окремих вихідних параметрів схеми від вхідних у вигляді експериментально отриманих графіків, таблиць тощо.

Застосування даного методу випробувань дозволяє сконструювати більш надійні РЕЗ та відмовитися від ряду складних лабораторних випробувань.

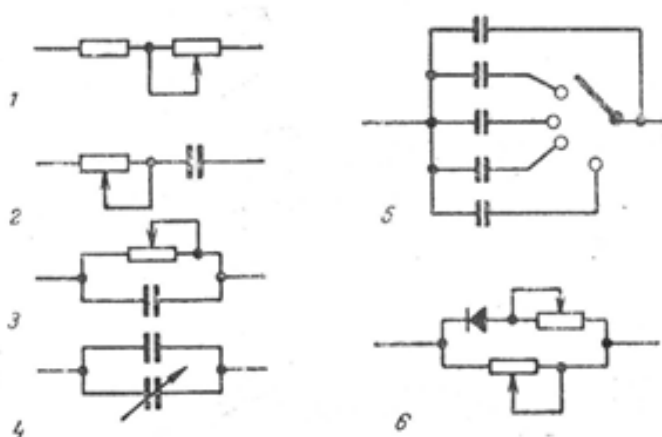
Недоліком методу є складність розрахунків, але за наявності сучасної комп'ютерної техніки ця проблема вирішується досить легко.

#### **4.2.1.2 Метод статистичних випробувань фізичним моделюванням**

*Метод статистичних випробувань фізичним моделюванням* РЕЗ передбачає проведення випробувань на реальних виробках або на їх електронних моделях.

При випробуваннях на реальних виробках проводяться дослідження процесів виникнення відмов в РЕЗ та їх наслідків шляхом штучного введення в схему обривів, коротких замикань або установки елементів невідповідних номіналів.

Проведення випробувань на електронних моделях полягає в тому, що певні елементи схеми замінюються фізичними моделями, що дозволяють змінювати величини характеризують їх параметрів. Так, наприклад, на рис. 4.2 наведені схеми макетів елементів, що дозволяють імітувати різні опори резисторів за допомогою змінних резисторів, різні ємності і втрати за допомогою змінних конденсаторів і резисторів, розкид параметрів напівпровідникових діодів за допомогою змінних резисторів.



1 - резистор; 2,3 - конденсатори постійної ємності; 4,5 - конденсатори змінної ємності; 6 - діод.

Рисунок 4.2 - Схеми макетів елементів

Моделювання різних елементів здійснюють на спеціальних стендах, що дозволяють відтворювати випадкові процеси зміни параметрів елементів. Для отримання випадкових процесів зміни напруг, які керують параметрами елементів, використовують спеціальні генератори випадкових процесів.

Перевагою даного методу є те, що відпадає необхідність в математичній моделі, що пов'язує вихідні параметри з вхідними (первинними). Зазначений зв'язок реалізується безпосередньо у фізичній моделі.

Недоліками методу є технічна складність виконання фізичних моделей ряду пристроїв (наприклад, високочастотних, імпульсних тощо), висока вартість стендів для проведення випробувань через їх складність та велику трудомісткість.

Розглянуті статистичні методи випробувань можуть застосовуватися як для моделювання процесів, що відбуваються всередині РЕЗ, так і для моделювання зовнішніх впливів, яким піддається РЕЗ під час експлуатації.

Для оцінки процесів обслуговування, крім статистичних методів випробувань, застосовують метод, званий теорією масового обслуговування, а також складаються диференціальні рівняння, що відображають динаміку технічного обслуговування.

#### 4.2.2 Граничні випробування

Під *граничними* розуміють такі випробування, при яких в певних умовах спостерігають зміну вихідних параметрів моделі при часткових значеннях вхідних параметрів; часткові значення вхідних параметрів можуть задаватися змінним опором або певним чином регульованою коміркою. Конкретні умови роботи моделі можуть задаватися за допомогою термокамер, вібростендів тощо.

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.

Користуючись методом граничних випробувань можливо ще в процесі розробки РЕЗ вибрати оптимальні варіанти схем, параметри їх елементів і режимів.

Проведення граничних випробувань складається з наступних етапів:

4.2.2.1 Визначення критеріїв відмови РЕЗ виходячи з умов роботи і відповідно до технічного завдання.

4.2.2.2 Визначення меж працездатності і надійності РЕЗ, що складається з елементів з номінальними параметрами, в залежності від змін напруги живлення, зовнішніх умов, параметрів вхідних сигналів.

4.2.2.3 Визначення меж працездатності і надійності РЕЗ, що працює в нормальних умовах (номінальні напруги живлення, параметри вхідних сигналів і зовнішні умови), в залежності від розкиду параметрів елементів РЕЗ.

Для здійснення граничних випробувань необхідно імітувати зміни параметрів різних схемних елементів (резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності, напівпровідникових приладів, мікросхем), що впливають на працездатність РЕЗ.

Найчастіше в якості граничного параметра в даному методі вибирають одну з живлячих напруг (параметр граничного випробування), яка використовується для імітації змін параметрів елементів схеми (наприклад, резисторів).

Зміну параметрів конденсаторів і котушок індуктивності імітують послідовно-паралельним включенням цих елементів.

Імітацію зміни прямого і зворотного струму напівпровідникових приладів здійснюють послідовним або паралельним включенням в схему додаткових резисторів відповідних номіналів.

Найбільшу складність представляє імітація зміни параметрів транзисторів і мікросхем, оскільки вони характеризуються складною сукупністю параметрів. У цих випадках підбирають групу елементів з однаковими параметрами, за винятком одного елемента, параметри якого змінюють в потрібному напрямку.

Розглянемо визначення границь справної роботи РЕЗ.

Змінюючи напругу граничного випробування до моменту відмови схеми при поминальних значеннях параметрів всіх елементів, визначається напруга відмови  $U_{гр0}$ .

Потім, змінивши один з параметрів розглянутого елемента, визначається, при якому новому значенні  $U_{гр}$  виникне відмова.

Зрозуміло, що при різних значеннях параметра ( $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ ) елемента відмови схеми будуть виникати при різній напрузі.

Таким чином, можна встановити, що певному відхиленню напруги граничного випробування  $\Delta U_{гр} = U_{грі} - U_{гр0}$  відповідає певне значення  $\Delta x$  - відхилення параметра елемента від номіналу.

За даними випробування будується графік залежності відхилення напруги граничного випробування до відмови схеми від відхилення параметра елемента від номіналу (рис. 4.3).

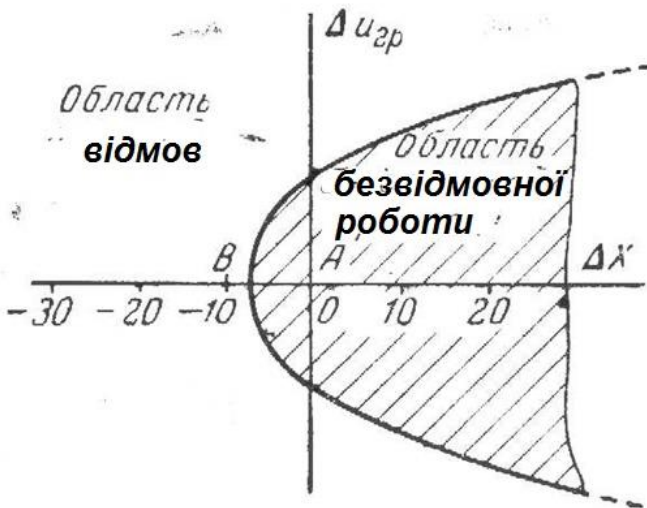


Рисунок 4.3 - Графік граничного випробування

З графіка випливає, що крива є границею, що відокремлює область безвідмовної роботи від області відмов.

Слід зазначити, що вид графіка граничного випробування має істотне значення для можливості його використання. При виборі напруги граничного випробування необхідно, щоб зміна величини

параметра забезпечувала малий і плавний нахил кривої до осі відхилення параметра елемента (рис. 4.4).

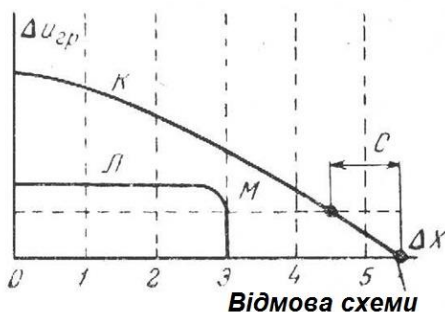


Рисунок 4.4 - Передбачення відмови при граничному випробуванні

Якщо при зміні зазначеної напруги лінія граничного випробування спочатку залишається постійною, а потім різко спадає до нуля, виключається можливість отримання своєчасної інформації про наближення відмови і виникає необхідність нового підбору напруги граничного випробування.

У більшості випадків при зміні параметрів граничних випробувань в широких межах контур безвідмовної роботи виявляється замкненим (рис. 4.5).

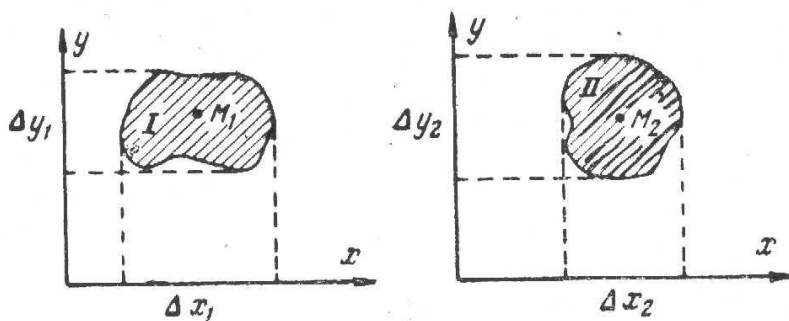


Рисунок 4.5 - Можливий вигляд замкнутого контуру області безвідмовної роботи

Знання графіків граничних випробувань дозволяє визначити «запас міцності» схеми, правильно вибрати номінали параметрів і режими елементів схеми, передбачити появу поступових відмов, а також порівняти надійність ідентичних схем за площами безвідмовної роботи.

Вибір номіналу параметра часто полягає у визначенні робочої точки (М) в центрі області безвідмовної роботи. Однак можливі випадки, коли вибір такого положення робочої точки виявиться невірним. Так, наприклад, при дрейфі параметра елемента в певному напрямку необхідно передбачати зрушення робочої точки в протилежному напрямку.

Зазвичай графік граничних випробувань знімають за умови, що параметри всіх схемних елементів, крім того, що піддається випробуванню, фіксовані. В реальних умовах зміни параметрів сильно взаємопов'язані між собою і зрушення параметра одного елемента може викликати небезпечно з точки зору надійності зрушення іншого. Тому при здійсненні граничних випробувань РЕЗ доводиться проводити великий обсяг роботи з визначення областей безвідмовної роботи ряду елементів. Отримані області накладають одну на одну і остаточно область безвідмовної роботи визначається загальним геометричним місцем точок для всіх областей (рис. 4.6).

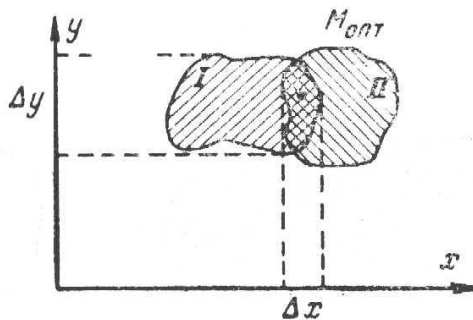


Рисунок 4.6 - Визначення області безвідмовної роботи схеми

Можливі два способи проведення випробування. При першому способі, змінюючи напругу загального джерела живлення, визначають момент відмови РЕЗ та відмови елемента. Однак в складних РЕЗ, що

містять різні схеми з різними величинами відхилень напруги від номінального значення, це призводить до наступних недоліків: неможливість виявлення відмови більш надійних схем за рахунок відмови малонадійних; вихід з ладу схем, розрахованих на малі напруги і не контрольованих при даних випробуваннях; виникнення міжкаскадних зв'язків, що призводить до помилкових результатів.

При другому способі складні РЕЗ розбивають на групи, кожна з яких має свою лінію граничного випробування.

Можливе виділення наступних груп:

- група напруг, що об'єднує лінії з загальними границями зміни напруги;
- група схем, яка об'єднує схеми, що перевіряються при одному відхиленні напруги;
- група індивідуальних ліній, коли РЕЗ випробовується почерговою подачею на кожну лінію живлення певної напруги.

При цьому до ліній живлення РЕЗ, які не підлягають випробуванню, подають номінальну напругу. Якщо перед випробуваннями був відомий запас надійності, то встановлюють величину напруги, що не перевищує це значення.

Відсутність відмови при нарузі, що відповідає запасу надійності, свідчить про те, що замість граничних випробувань була проведена гранична перевірка працездатності.

Переваги методу граничних випробувань: можливість отримання інформації про надійність РЕЗ на етапі проектування, зручність вибору оптимального робочого режиму, скорочення обсягу випробувань на зовнішні впливи, можливість порівняння різних схем з точки зору їх надійності.

Недоліками методу граничних випробувань є неможливість кількісної оцінки надійності; трудомісткість проведення експериментів, що виключає можливість отримання даних про зміну вихідних параметрів РЕЗ при зміні комплексу зовнішніх впливів і взаємодії елементів; відсутність чітких правил щодо проведення граничних випробувань та аналізу їх результатів; недостатня ефективність через можливість маневрування тільки одним параметром при всіх інших фіксованих.

### 4.2.3 Матричні випробування

Широке застосування граничних випробувань виявляється практично неможливим через те, що кожен параметр будь-якого елемента або РЕЗ пов'язаний складної функціональної залежністю з іншими параметрами елемента або схеми, а також залежить від впливу різних зовнішніх факторів.

**Метод матричних випробувань**, який є подальшим розвитком граничних випробувань, полягає в тому, що при випробуванні здійснюють моделювання робочої області РЕЗ при всіх можливих значеннях первинних параметрів, які перебувають в межах допусків.

Для моделювання параметрів схеми, що лежать в межах, передбачених технічним завданням, складають матрицю станів.

У загальному випадку працездатність і надійність РЕЗ залежать від великої кількості параметрів елементів схеми і зовнішніх факторів, що впливають на величину цих параметрів.

Розглянемо приклад, у якому для зручності обмежимося розглядом матричних випробувань пристрою, працездатність якого залежить лише від двох параметрів, і є необхідна інформація про характер випадкових впливів, про сигнал і деякі інші закономірності.

Усі параметри, від яких залежить робота РЕЗ, називаються визначальними. Вважатимемо, що діапазон їх можливих значень обмежений інтервалами  $(x_{1\text{мін}}, x_{1\text{макс}})$ ,  $(x_{2\text{мін}}, x_{2\text{макс}})$ . Ці інтервали визначаються допусками відповідно до технічних вимог, що пред'являються до РЕЗ та його елементів.

Розіб'ємо ці інтервали на однакові ділянки (кванти), кількість яких відповідно буде  $l^{(1)}$  та  $l^{(2)}$ .

Значення параметрів, що відповідають серединам ділянок, називаються представниками квантів.

Стан РЕЗ, при якому визначальні параметри знаходяться в заданому кванті і приймають значення представника кванта, називається ситуацією стану схеми.

При двох параметрах, що визначають працездатність схеми, кількість можливих ситуацій РЕЗ дорівнює:

$$N_2 = l^{(1)} \cdot l^{(2)}$$

Індекс 2 при N означає, що розглядається двовимірний випадок, тобто маємо два визначальні параметри.

У загальному випадку при n визначальних параметрах кількість можливих ситуацій дорівнює:

$$N = \prod_{j=1}^n l^{(j)}$$

Кожна ситуація стану відповідає конкретним значенням параметрів елементів. Під впливом різних факторів змінюються і параметри ситуації.

Для урахування одночасної зміни всіх визначальних параметрів користуються послідовністю ситуацій  $a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_m$ .

З метою моделювання можливих станів складемо матрицю ситуацій:

$$\|a\| = \left\| \begin{array}{c} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1k}^{(1)}, \dots, a_{1l}^{(1)} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2k}^{(2)}, \dots, a_{2l}^{(2)} \\ \vdots \\ a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jk}^{(j)}, \dots, a_{jl}^{(j)} \\ \vdots \\ a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nk}^{(n)}, \dots, a_{nl}^{(n)} \end{array} \right\|$$

Тут перший індекс при a характеризує параметр, а другий показує, до якого кванта даного параметра він належить.

Наявність матриці комбінацій випадкових величин, що характеризують вхідні параметри РЕЗ, дозволяє чисельним методом визначити можливі реалізації випадкових значень вхідних параметрів.

Перебір всіх можливих ситуацій для даного пристрою може бути здійснений шляхом приведення матричних випробувань, а також методом фізичного моделювання. Очевидно, що деякі з ситуації будуть відмовні, послідовність яких позначимо:  $w_1, w_2, \dots, w_\mu, \dots, w_\gamma$ .

Знання ймовірності появи відмовних ситуацій  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ , ...,  $P_\mu(t)$ , ...,  $P_\gamma(t)$ . дозволяє визначити область працездатності.

Ймовірність того, що в момент часу  $t$  схема виявиться непрацездатною, дорівнює:

$$P(t) = \sum_{\mu=1}^{\gamma} P_{\mu}(t)$$

Ймовірність працездатності схеми в момент включення можна визначити, припустивши  $t = 0$ . У цьому випадку ймовірність відмови схеми після складання ( $P_{СК}$ ) дорівнює:

$$P_{СК} = P(0) = \sum_{\mu=1}^{\gamma} P_{\mu}(0)$$

Таким чином, знання законів «старіння» окремих елементів схеми і початкового значення ймовірності постійних відмов  $P_{СК}$  дозволяє визначити ймовірність появи відмовних ситуацій  $P(t)$ .

Перевагою методу матричних випробувань є можливість оптимізації надійності РЕЗ, тобто можливість отримання інформації про ступінь надійності РЕЗ (співвідношення відмовних та невідмовних ситуацій в межах робочої області).

До недоліків методу, що обмежує його застосування, відносяться відсутність інформації про співвідношення робочої області і області функціонування, що виключає оцінку запасу надійності, а також неможливість кількісної оцінки надійності.

## 5 ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ

### 5.1 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].

*Основною метою програми випробувань* є отримання даних для введення необхідних змін в конструкцію, що забезпечують підвищення якості апаратури, а також отримання оцінки фактичної надійності РЕЗ.

Коли необхідно отримати довідкові дані про кількісні показники надійності і про їх залежності від часу і ступеня жорсткості факторів, що впливають, проводять спеціальні випробування на надійність, що отримали назву визначальних. Точність оцінки показників надійності залежить від обсягу випробувань (кількості зразків і тривалості випробувань).

При розробці ПВ необхідно враховувати, в якому вигляді бажано отримати результат випробувань: або у вигляді випадкової події - позитивний результат або відмову, - або у вигляді кількісної величини, що характеризує певні електричні параметри РЕЗ. Також необхідно враховувати, чи є випробовувана апаратура одноразової або багаторазової дії.

В основу розробки ПВ повинні бути покладені ймовірні і статистичні методи, що дозволяють забезпечити науково обгрунтоване планування випробувань і оцінку їх результатів. Для визначення кількості зразків і тривалості випробувань необхідне знання законів розподілу відмов. Прийнято вважати, що для складної апаратури багаторазового дії раптові і поступові відмови розподілені за експоненціальним законом, а для апаратури одноразового дії - за біноміальним.

При розробці ПВ необхідно виходити з класифікації виробів за функціонально-конструктивною ознакою, відповідно до якої всі вироби діляться на класи деталей, вузлів, приладів, комплектів і

систем. З точки зору випробувань зазначені класи виробів можна об'єднати в дві групи: I або нижча група, що об'єднує вироби, що не мають самостійного експлуатаційного призначення (деталі, вузли, блоки), і II або вища, група, що об'єднує вироби, що мають самостійне експлуатаційне призначення: прилади і системи.

Вирішення питання про те, чи випробувати вироби нижчої або вищої групи, приймається конкретно для кожного випадку.

Випробування виробів нижчої групи вимагають застосування більш простої, дешевої і менш габаритної випробувальної апаратури, а також дозволяють швидше виявити слабкі місця виробів, оскільки на результати випробувань не впливають інші взаємодіючі з ними елементи РЕЗ. При цьому можливе максимально швидке прийняття необхідних заходів щодо вдосконалення цих виробів і усунення виявлених несправностей до моменту закінчення проектування і виготовлення всієї системи.

У ряді випадків можливе використання для випробувань уже наявної контрольно-вимірювальної апаратури, призначеної для випробувань ідентичних виробів.

Випробування вищої групи виробів забезпечують отримання результатів, які враховують можливі взаємодії різних блоків і частин РЕЗ при меншому обсязі робіт, оскільки для випробувань потрібні менший час і число зразків. Однак для отримання великого значення ймовірності безвідмовної роботи системи необхідно, щоб елементи, що входять до неї, мали досить високу ймовірність безвідмовної роботи. Таким чином, отримання при випробуваннях стійких значень  $P_1, P_2, \dots, P_N$  виробів нижчої групи призводить до необхідності збільшення кількості випробовуваних виробів, а також тривалості випробувань.

Вирішивши питання про об'єкт випробувань, складають ПВ. Вона 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, а також підписи керівників організації-розробника РЕЗ і, при необхідності, представника замовника, які погоджують та затверджують програму.

Програма випробувань складається з шести розділів.

### **5.1.1 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, які повністю відповідають НТД з конструкції, зовнішнього вигляду, а також параметрів, що визначаються при 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 вибірковому 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 заміняють 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 здорожує випробування на надійність.

### 5.1.2 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 у НТД. Цей вид контрольних випробувань проводиться щомісяця або щоквартально, а також на початку випуску виробу 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 виробу, наприклад, багаторазові удари, термоциклування 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 конструцію 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.

### **5.1.3 Розділ 3. Обґрунтування необхідності проведення випробувань**

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

### **5.1.4 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.

### **5.1.5 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. 5.1, механічних випробувань - в табл. 5.2.

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 вибирати 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. 5.3 у якості прикладу наведені види випробувань, що проводяться у одному з випробувальних центрів сертифікації радіоелектронної техніки, з вказівкою обладнання для випробувань.

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

### **5.1.6 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.

### **5.1.7 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. 5.4.

Таблиця 5.1 - 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 5.2 - 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 одиначних ударів	+	-
Випробування на вплив лінійних прискорень	+	-
Випробування на вплив акустичного шуму	+	-

Таблиця 5.3 - Види випробувань та характеристики випробувального обладнання

Вид випробування	Загальні технічні характеристики випробувального обладнання	Типи обладнання
<b>Випробування на механічні впливи</b>		
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
<b>Випробування на кліматичні впливи</b>		
Підвищена температура	Температури від НКУ до +350°C	КТ-0,4-350
	Максимальний об'єм камери до 0,5 м <sup>3</sup>	12КТ-0063-026
Знижена температура	Температури від НКУ до -85°C	VMТ07/64
	Максимальний об'єм камери до 0,4 м <sup>3</sup>	МС-81
Зміна температур	Діапазон температур від -65°C до +200°C	12КТЦ-65/200
	Максимальний об'єм камери до 0,02 м <sup>3</sup>	
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 <sup>3</sup>	
Соляний туман	Діапазон температур від +25°C до +90°C	12КТМТ-0,4-001
	Дисперсність туману 1...10 мкм	
	Водність аерозолу 2...3 г/м <sup>3</sup>	
	Максимальний об'єм камери до 0,4 м <sup>3</sup>	
Сонячна радіація	Діапазон температур від +50°C до +70°C	КСР-1
	Щільність випромінювання 1120 Вт/м <sup>2</sup>	
	У УФ-частині спектру 68 Вт/м <sup>2</sup>	
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	
Дощ	Інтенсивність дощу 3...110 мм/хв.	КД-0,4 12КТХБ-0,4
	Максимальний об'єм камери до 0,4 м <sup>3</sup>	
Цвіліві гриби	Температура +29°C Відносна вологість до 100%	Термостатна кімната

Таблиця 5.4 - 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 для досягнення показників якості	Визначення можливості пред'явлення на приймальні випробування	Вирішення запуску продукції у виробництво або використання її за призначенням
Обсяг випробувань	Визначається головним конструктором	Визначається НТД	Дослідна партія
Вироби, що випробуються	Макетні зразки	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
Документ на випробувальне обладнання	-	Атестоване обладнання	Атестоване обладнання
Звітність	Службовий зошит, технічний звіт	Звіт з даними про випробування	Звіт з результатами випробувань

## 5.2 Методика випробувань

Ще одним організаційно-методичним документом є методика випробувань, 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 з визначення 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 вимогам 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. 5.5.

Зміст методики випробувань можна представити у вигляді схеми (див. рис. 5.1).

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 5.5 - 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

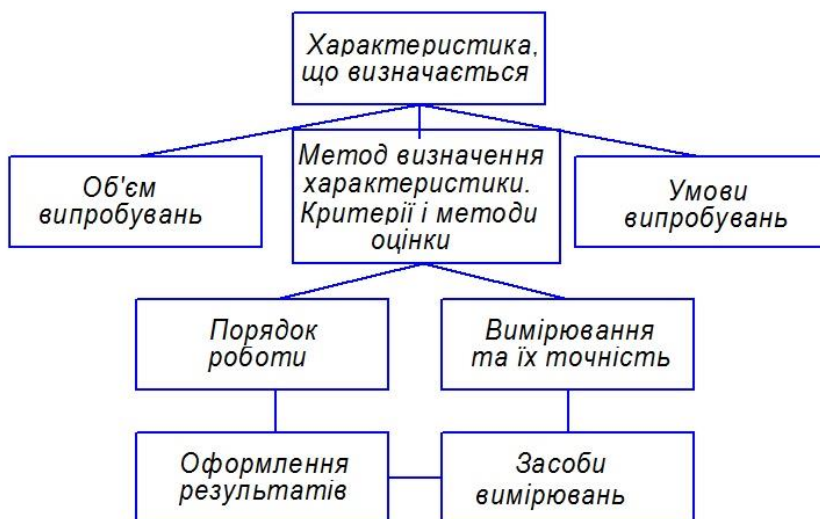


Рисунок 5.1 - Схема змісту методики випробувань

**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 виробу 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 тощо).

При випробуваннях послідовно-паралельним способом виробу необхідно розподілити за групами, підгрупами. Такий розподіл проводять випадковим методом.

Всі виробу до постановки їх на випробування потрібно промаркувати.

**Спільна перевірка пристроїв для випробувань і виробів, що випробовуються**, 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 методика 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 випробується 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).

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.

### **5.3 Звітність при проведенні випробувань**

У процесі проведення випробувань потрібно вести облік і аналіз відмов. При цьому необхідно з'ясувати, чим пояснюються відхилення експериментальних даних і характеристик від очікуваних на підставі теоретичних розрахунків.

За результатами випробувань визначають передбачені в ТУ параметри РЕЗ, кількісні характеристики надійності, оцінюють їх відповідність заданим і розробляють рекомендації щодо їх підвищення.

Усі матеріали з проведених випробувань оформляють у вигляді звіту, який повинен містити: програму і методику випробувань, протокол випробувань, зведену відомість відмов.

Бланки, форми і приклади оформлення цих документів наведені у додатках А - Г.

## 6 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

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 мінімальній 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 випробуються паралельно. У кожній з груп випробування проводять послідовним способом.

В даному випадку всі види випробувань повинні бути розбиті також на групи, кількість яких дорівнює кількості 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

можливого розбиття видів випробувань на групи і послідовність їх проведення в кожній групі наведений в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - 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. 6.2 наведена рекомендована послідовність комбінованих кліматичних та механічних випробувань.

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.

Таблиця 6.2 - 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 Dб. 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 за МЕК 529 до завершення роботи з випробування Д і з випробування К в МЕК 68-2.

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.

## 7 ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА МЕХАНІЧНІ ВПЛИВИ

### 7.1 Впливи механічних факторів на РЕЗ

У залежності від свого призначення РЕЗ може піддаватися різним механічним впливам.

Основними механічними навантаженнями для РЕЗ при експлуатації є вібраційні, ударні впливи, лінійні прискорення, а також звуковий тиск.

Одним із найнебезпечніших видів механічних впливів, що до того ж найчастіше зустрічається на практиці, є *вібрація*. У загальному випадку під вібрацією РЕЗ розуміють коливання самого об'єкту чи будь-яких частин його конструкції в діапазоні частот 0,1...20000 Гц та вище амплітуд переміщень 0,001 мкм ...1000 мм і більше, амплітуд віброприскорень до 1000 м / с<sup>2</sup> і більше.

Найчастіше на РЕЗ впливає вібрація, яка може виникати при транспортуванні, та при експлуатації апаратури на рухомих об'єктах. Джерелами механічних вібрацій для стаціонарної апаратури зазвичай є незбалансовані частини машин та механізмів що обертаються, енергетичне устаткування

Вібраційні навантаження викликають переважно механічні напруження і деформації як комплектуючих виробів, так і елементів конструкції РЕЗ.

Якщо деформації пружні, то їх вплив може призвести до нестабільності параметрів виробу за рахунок появи додаткового спектру частот збудження (віброшумів). Після припинення впливу вібрації, що викликає пружні деформації виробів, їх функціонування відновлюється.

Але вібрація може викликати і незворотні зміни встановлених значень параметрів регульованих елементів конструкції РЕЗ.

Під впливом навіть невеликих за амплітудою, але тривалих вібраційних навантажень можуть з'являтися втомні явища в матеріалах конструкції, що призводять до виведення з ладу або руйнування виробів. Особливо небезпечні явища резонансу, коли власна частота будь-якої частини конструкції виробу знаходиться в межах спектру частот діючої вібрації, в результаті чого навантаження зростають у багато разів. Це може призвести до обриву виводів елементів, з'єднувальних провідників, порушення герметизації, виникненню коротких замикань.

Найбільшу небезпеку становлять резонанси окремих компонентів і вузлів, що виникають у випадках, коли їх власна частота  $f_0$  збігається з частотою діючих на апаратуру вібрацій  $f$ .

Однією з основних причин вібрацій і резонансів є наявність зазорів між деталями і люфтів в з'єднаннях. Чим вище частота коливань, тим при меншому зазорі може виникнути резонанс.

**Ударні навантаження** найчастіше виникають під час експлуатації виробів, їх виникнення пов'язане з різкою зміною прискорення, швидкості або напрямку переміщення об'єкту.

В результаті механічних впливів у вигляді ударів в РЕЗ можуть спостерігатися такі пошкодження:

- повне руйнування корпусу або його частин;
- відрив монтажних з'єднань і виводів електрорадіоелементів;
- тимчасовий або остаточний вихід з ладу роз'ємних і нероз'ємних електричних контактів (у з'єднувачах, реле тощо);
- зміщення положення органів настройки та регулювання;
- відшарування друкованих провідників і розшарування багатошарових друкованих плат;
- вихід з ладу механічних вузлів (зубчастих пар, підшипників, кріплення);
- зміна параметрів конденсаторів змінної ємності, котушок індуктивності внаслідок зсуву та зміни геометричних розмірів;
- зниження чутливості і зміщення частотного діапазону приймальних пристроїв.

На апаратуру, що експлуатується на рухомих об'єктах, та на будь-яку апаратуру при транспортуванні діють **лінійні прискорення**, що виникають при зміні швидкості руху або під час криволінійного руху. Результатом їх дії є сили інерції, вплив яких на РЕЗ аналогічний впливу ударів.

**Акустичний шум** - зовнішній механічний фактор, який також може впливати на працездатність РЕЗ. Діапазон частот акустичного шуму 125...10000 Гц, максимальний рівень звукового тиску - 200 дБ та вище. Механізм руйнівного впливу акустичного шуму аналогічний руйнівному впливу вібрацій.

Механічні випробування РЕЗ дозволяють виявити наявність дефектів, визначити динамічні характеристики випробовуваних виробів, провести оцінку впливу конструктивних факторів на параметри якості РЕЗ, перевірити відповідність параметрів виробу при механічних впливах вимогам ТУ.

## 7.2 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 з визначення резонансних частот конструкції допускається проводити на окремих типах (типорозмірах, типоміналах) 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 виробі.

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 виробу, що мають чотири або більше резонансів в робочому діапазоні частот, випробують на вплив широкосмугової випадкової вібрації; виробу, що мають менше чотирьох резонансів в робочому діапазоні частот, випробують на вплив синусоїдальної вібрації.

Випробуванням на ударну міцність не піддають виробу, 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 виробу, 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 виробі.

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

Кількість 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 виробі.

## **7.2.1 Структура методики випробувань на механічні впливи**

Рекомендується наступна структура методики механічних випробувань.

**7.2.1.1 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;
- ТУ або стандартами на виробі;
- інструкцією з проведення випробувань;
- інструкцією з експлуатації випробувального устаткування;
- інструкцією з забезпечення техніки безпеки.

**7.2.1.2 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;
- відчуття кольору - 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.

#### **7.2.1.3 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.

**7.2.1.4 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.

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

**7.2.1.6 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.

**7.2.1.7 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.

**7.2.1.8 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].

## **7.2.2 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.

### 7.2.3 Хід 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.

Види випробувань на механічні впливи відповідно до стандарту [12] наведені у табл. 7.1.

Таблиця 7.1 - Види випробувань на механічні впливи

Найменування випробування	№ випробування
1	2
Визначення динамічних характеристик конструкції (на визначення резонансних частот)	100
Випробування на наявність резонансних частот конструкції у заданому діапазоні частот	101
Випробування на стійкість при впливі синусоїдальної або випадкової ширококутної вібрації (на вібростійкість)	102

Продовження табл. 7.1

1	2
Випробування на міцність при впливі синусоїдальної або випадкової ширококутної вібрації тривале (на віброміцність тривале)	103
Випробування на міцність при впливі синусоїдальної вібрації короткочасне (на віброміцність короткочасне)	103
Випробування на міцність при впливі механічних ударів багаторазової дії (на ударну міцність)	104
Випробування на стійкість при впливі механічних ударів багаторазової дії (на ударну стійкість)	105
Випробування на вплив механічних ударів одноразової дії (на вплив одиночних ударів)	106
Випробування на вплив лінійного прискорення	107
Випробування на вплив акустичного шуму	108
Випробування виводів на вплив розтягуючої сили	109
Випробування гнучких дротяних та смужкових виводів на згин	110
Випробування гнучких пелюсткових виводів на згин	111
Випробування гнучких дротяних виводів на скручування	112
Випробування різьбових виводів на вплив крутильного моменту	113
Випробування на вплив синусоїдальної вібрації з підвищеним значенням амплітуди прискорення	114
Випробування на міцність при падінні	115
Випробування на стійкість при впливі хитання тривалих нахилів	116
Випробування на вплив повітряного потоку	117
Випробування на вплив ударів по оболонці виробу	118

### 7.3 Випробування на механічний резонанс

#### 7.3.1 Випробування на визначення резонансних частот конструкції (метод 100)

Випробування проводять з метою перевірки механічних властивостей виробів і отримання вихідної інформації для вибору

методів випробувань на вібростійкість, віброміцність, на вплив акустичного шуму, а також для вибору тривалості дії ударного прискорення при випробуваннях на вплив механічних ударів одиночної і багаторазової дії.

Значення резонансних частот конструкції, виявлені в процесі досліджень, повинні бути вказані в стандартах і ТУ на виріб. Випробування проводять на окремій вибірці виробів, що дорівнює 3...5 шт.

Вібраційна установка повинна забезпечувати синусоїдальні коливання у всьому діапазоні частот, встановленому в стандартах і ТУ на вироби та в ПВ для даного виду випробувань. Пристрій для визначення резонансних частот конструкції повинен забезпечувати реєстрацію зміни фази механічного коливання на  $90^\circ$ , якщо принцип його роботи заснований на порівнянні фаз коливань точки кріплення виробу і точки виробу, в якому визначається резонанс.

Випробування проводять в діапазоні частот від  $0,2 f_p$  до  $1,5 f_p$ , але не вище 20000 Гц, де  $f_p$  - резонансна частота, яка визначається методом розрахунку або на підставі випробувань вивченої аналогічної конструкції. Якщо орієнтоване значення резонансної частоти не відоме, то випробування проводять в діапазоні частот 40...20000 Гц або до частоти, встановленої в стандартах і ТУ на вироби.

Пошук резонансних частот проводять шляхом плавної зміни частоти при підтримці постійної амплітуди прискорення.

Амплітуда прискорення повинна бути мінімально можливою, але достатньою для виявлення резонансу і не перевищувати амплітуду прискорення, встановлену для випробування на віброміцність.

Амплітуду прискорення рекомендується вибирати з діапазону  $10...50 \text{ м/с}^2$  (1...5) g. На етапах конструювання  $f_p$  розраховують і потім її значення перевіряють на вібростенді.

### **7.3.2 Випробування на наявність резонансних частот конструкції в заданому діапазоні частот (метод 101)**

Випробування проводять з метою перевірки відсутності резонансних частот у виробів і їх деталей в одному з діапазонів частот, встановлених в таблиці 7.2. Випробування проводять в діапазоні частот від 10 Гц до  $1,1 f_v$ , де  $f_v$  - верхня частота діапазону, встановленого в таблиці 1.1, якщо інший діапазон не вказаний в стандартах і ТУ на вироби і ПВ.

Випробування проводять у трьох взаємно перпендикулярних напрямках по відношенню до виробу, якщо інші вказівки з вибору напрямків не вказані в стандартах і ТУ на виробі і ПВ.

При проведенні випробувань перевіряють на наявність резонансів всі основні деталі виробу, у яких можливі резонанси в діапазоні частот, що перевіряється. Особливу увагу приділяють деталям, що визначають структуру виробу і його функціональне призначення.

Пошук резонансів проводять шляхом плавної зміни частоти при підтриманні постійної амплітуди переміщення в контрольній точці нижче частоти переходу і постійної амплітуди прискорення вище частоти переходу для відповідного ступеню жорсткості (табл. 7.2).

Таблиця 7.2 - Режими випробувань на наявність резонансних частот

Верхня частота діапазону частот, Гц	Ступені жорсткості
25	I
40	II
100	III

Амплітуда прискорення повинна бути мінімально можливою, але достатньою для виявлення резонансу і такою, що не перевищує амплітуду прискорення при випробуванні на вібростійкість і віброміцність.

Амплітуду переміщення рекомендується вибирати з діапазону 0,5...1,5 мм, амплітуду прискорення - 10...50 м/с<sup>2</sup> (1...5) g, при цьому частоту переходу  $f_n$  в Гц визначають за формулою:

$$f_n = \sqrt{\frac{250 \cdot j}{A}}$$

де  $j$  - амплітуда прискорення, g;

$A$  - амплітуда переміщення, мм.

Конкретне значення амплітуди переміщення і прискорення вказують в стандартах і ТУ на виробі і ПВ.

Швидкість зміни частоти повинна бути такою, щоб забезпечити можливість виявлення і реєстрації резонансів, і не перевищувати 1 октаву в хвилину. Вважається, що виробі витримали випробування, якщо у них відсутні резонанси в діапазоні частот, зазначеному в стандартах і ТУ на виробі і ПВ.

## 7.4 Випробування на вібростійкість (метод 102)

Випробування на вібростійкість проводять з метою перевірки здатності виробів виконувати свої функції і зберігати свої параметри в межах значень, вказаних в стандартах і ТУ на вироби в умовах впливу вібрації. Випробування проводять одним з наступних методів:

- метод 1 - випробування на вібростійкість при впливі синусоїдальної вібрації;
- метод 2 - випробування на вібростійкість при впливі широкосмугової випадкової вібрації.

Випробування за методом 2 проводять для виробів, що мають в заданому діапазоні частот не менше 4 резонансів, якщо до виробів пред'явлені вимоги щодо стійкості до впливу випадкової вібрації.

### 7.4.1 Випробування на вібростійкість при впливі синусоїдальної вібрації

Вібраційна установка повинна забезпечувати отримання в контрольній точці синусоїдальної вібрації з параметрами, встановленими для необхідного ступеню жорсткості.

Випробування проводять під електричним навантаженням, характер, параметри і метод контролю якого повинні бути встановлені в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ, шляхом плавної зміни частоти в заданому діапазоні від нижчої до вищої і назад. Для виробів з лінійними резонансними характеристиками випробування проводять шляхом зміни частоти в одному напрямку.

Швидкість зміни частоти встановлюється рівною 1...2 октавам в хвилину. Якщо для контролю параметрів виробу потрібно більше часу, ніж той, що забезпечується при даній швидкості розгортки частоти, то допускається встановлювати швидкість зміни частоти менше 1 октави в хвилину.

При цьому швидкість зміни частоти повинна бути максимальною, але достатньою для забезпечення контролю необхідних параметрів.

В діапазоні частот нижче частоти переходу підтримують постійну амплітуду переміщення, а вище частоти переходу - постійну амплітуду прискорення.

Режими випробувань - діапазон частот, амплітуда переміщення, частота переходу і амплітуда прискорення - наведені в таблиці 7.3.

У процесі випробування проводять контроль параметрів виробів. Значення параметрів і метод перевірки вказують в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ. Для перевірки вібростійкості рекомендується вибирати параметри, за зміною яких можна судити про вібростійкість виробу в цілому (наприклад, рівень віброшумів, спотворення вихідного сигналу або зміна його величини, цілісність електричної мережі, нестабільність контактного опору тощо).

Таблиця 7.3 - Режими випробувань на вібростійкість при впливі синусоїдальної вібрації

Ступінь жорсткості	Діапазон частот, Гц	Амплітуда переміщення, мм	Частота переходу, Гц	Амплітуда прискорення, $m/c^2$ (g)
I	10-35	-	-	5(0,5)
II	10-55	-	-	10(1,0)
III	10-55	0,5	32	20(2,0)
IV	10-55	0,5	-	-
V	10-80	0,5	32	20(2,0)
VI	10-80	0,5	50	50(5,0)
VII	10-100	0,5	50	50(5,0)
VIII	10-200	0,5	50	50(5,0)
IX	10-500	0,5	50	50(5,0)
X	10-500	1,0	50	100(10,0)
XI	10-2000	1,0	50	100(10,0)
XII	10-2000	2,0	50	200(20,0)
XIII	10-2000	4,0	50	400(40,0)
XIV	10-5000	4,0	50	400(40,0)

При виявленні у виробів частот, на яких спостерігається нестабільність роботи або погіршення параметрів, додатково проводять витримку на цих частотах протягом часу, зазначеного в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ, але не менше 5 хв.

Випробування проводять при впливі вібрації в трьох взаємно перпендикулярних напрямках по відношенню до виробу, якщо інші умови не вказані в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ.

В кінці випробувань проводять візуальний огляд виробів і вимірювання їх параметрів.

### 7.4.2 Випробування на вібростійкість при впливі ширококутної випадкової вібрації

Вібраційна установка повинна забезпечувати отримання в контрольній точці ширококутної випадкової вібрації з параметрами, встановленими для необхідного ступеню жорсткості.

Випробування проводять шляхом впливу ширококутної випадкової вібрації в режимах, зазначених у таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 - Режими випробувань на вібростійкість при впливі ширококутної випадкової вібрації

Ступінь жорсткості	Діапазон частот, Гц	Середнє квадратичне прискорення, $m/c^2$ (g)	Спектральна щільність прискорення, $g^2/Гц$
I	20-2000	100(10)	0,05
II	20-2000	200(20)	0,20
III	20-5000	300(30)	0,20
IV	20-5000	500(50)	0,50

Тривалість впливу вібрації в кожному напрямку впливу визначається часом перевірки працездатності виробу.

Параметри, що перевіряються, їх значення і методи перевірки вказують в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ.

### 7.5 Випробування на віброміцність (метод 103)

Випробування проводять з метою перевірки здатності виробу протистояти руйнівній дії вібрації і зберегти свої параметри в межах значень, вказаних в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ після її впливу.

Випробування проводять одним з наступних методів (вибір методу визначається в залежності від значення резонансних частот конструкції).

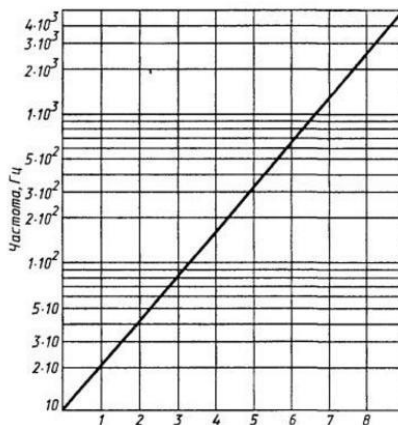
## 7.5.1 Випробування методом частоти, що хитається

### 7.5.1.1 Метод 1а - випробування методом частоти, що хитається, у всьому діапазоні частот

Метод застосовують для виробів, у яких резонансні частоти розподілені у всьому діапазоні частот випробувань або не встановлені. Випробування проводять шляхом впливу синусоїдальної вібрації при безперервній зміні частоти у всьому діапазоні частот від нижнього значення до верхнього і назад (цикл хитання) за графіком, наведеним на рис. 7.1. Час зміни частоти в діапазоні визначають за рис. 7.1, округлюючи його до найближчих значень, що забезпечуються системою управління вібраційного установкою.

В діапазоні частот від 10 Гц до частоти переходу підтримують постійну амплітуду переміщення, а починаючи з цієї частоти до верхньої частоти заданого діапазону підтримують постійну амплітуду прискорення, відповідну заданому ступеню жорсткості.

Діапазон частот вібрації, амплітуду переміщення, частоту переходу, амплітуду прискорення, розрахункове число циклів хитання частоти і загальну тривалість впливу вібрації вибирають з таблиці 7.5. Тривалість випробування визначається загальним часом впливу або розрахунковим числом циклів хитання частоти.



*Тривалість половини циклу хитання, хв.*

Рисунок 7.1 - Залежність тривалості половини циклу хитання від частоти

Таблиця 7.5 - Режими випробувань на віброміцність методом частоти, що хитається

Ступінь жорсткості	Діапазон частот, Гц	Амплітуда переміщення, мм	Частота переходу, Гц	Амплітуда прискорення, м/с <sup>2</sup> (g)	Розрахунковий час циклу, хв.
I	10-35	0,5	28	15 (1,5)	4
III	10-55	0,5	50	50 (5,0)	5
IV	10-55	1,0	45	80 (8,0)	5
VI	10-80	0,5	50	50 (5,0)	6
VIII	10-100	-	-	5 (0,5)	7
X	10-100	0,5	28	15 (1,5)	7
XI, XII	10-100	0,5	39	30 (3,0)	7
XIII	10-100	1,5	50	150 (15,0)	7
XIV	10-200	0,5	32	20 (2,0)	8
XVIII-XX	10-500	0,5	32	20 (2,0)	12
XXII	10-500	1,0	50	100 (10,0)	12

**7.5.1.2 Метод 16 - випробування методом частоти, що хитається, при підвищених значеннях амплітуди прискорення.**

Випробування даним методом проводять у всіх випадках, коли є необхідність скорочення часу випробувань. Рекомендується застосовувати цей метод для випробування мініатюрних виробів для ступенів жорсткості XIII, XIV.

Вібраційна установка повинна забезпечувати отримання в контрольній точці синусоїдальної вібрації з параметрами, встановленими для заданого ступеню жорсткості з урахуванням вібраційного значення амплітуди прискорення.

Випробування проводять аналогічно методу 1а, але при амплітудах переміщення і прискорення, що перевищують зазначені в табл. 7.5, і скороченій тривалості впливу вібрації. Число циклів хитання також зменшують відповідно скорочення тривалості впливу вібрації.

Тривалість впливу вібрації  $T_B$  для вібраційного значення амплітуди прискорення  $j_B$  розраховують за формулою:

$$T_B = T_0 \left( \frac{j_0}{j_B} \right)^2$$

де  $j_0$ ,  $T_0$  – відповідно, амплітуда прискорення і тривалість впливу вібрації, наведені в табл. 7.5.

Рекомендується приймати:

$$\frac{j_0}{j_B} = 0,4 \dots 0,7$$

При скороченні тривалості впливу вібрації шляхом збільшення амплітуди прискорення слід враховувати діапазон лінійності характеристики міцності виробу, тобто при підвищеному рівні амплітуди прискорення неприпустимий прояв якісно нових механізмів відмов, які не мають місця при рівні амплітуди прискорення, наведеному в табл. 7.5.

У стандартах і ТУ на виріб повинно бути вказано, що випробування проводять в прискореному режимі.

В діапазоні частот від 10 Гц до частоти переходу амплітуду переміщення збільшують у стільки ж разів, що і амплітуду прискорення (в межах можливості випробувального устаткування) в порівнянні з амплітудами переміщення, зазначеними в таблиці 7.5.

**7.5.1.3 Метод 1в - випробування методом частоти, що хитається,** виключаючи діапазон частот нижче 100 Гц. Даний метод застосовують, якщо нижча резонансна частота виробу перевищує 200 Гц.

Випробуванням на віброміцність піддають ті ж зразки виробів, які були випробувані на вібростійкість, якщо останній вид випробування передбачений в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ.

Вібраційна установка повинна забезпечувати отримання в контрольній точці синусоїдальної вібрації з амплітудою прискорення, що відповідає заданому ступеню жорсткості в діапазоні частот від 100 Гц до верхньої частоти, встановленої для заданого ступеню жорсткості.

Випробування проводять шляхом впливу синусоїдальної вібрації при безперервній зміні частоти в одному з діапазоні частот, наведених в табл. 7.6, від нижнього значення до верхнього і назад (цикл хитання) і підтримки постійної амплітуди прискорення.

Час зміни частоти визначають за рис. 7.1, округляючи його до найближчих значень, що забезпечуються системою управління вібраційною установкою.

Амплітуду прискорення вибирають з таблиці 7.5, а тривалість впливу вібрації, розрахунковий час циклу хитання і розрахункову кількість циклів хитання вибирають з таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 - Режими випробувань на віброміцність

Ступінь жорсткості	Діапазон частот, Гц	Тривалість впливу вібрації, год.	Розрахунковий час циклу хитання, хв.	Розрахункова кількість циклів хитання
IX-X	100-500	20	5	240
XI-XII	100-2000	15	9	100
XIII, XIV	100-2000	15	9	100

**7.5.1.4 Метод 1г - випробування методом частоти, що хитається,** в області резонансних частот.

Даний метод застосовують для виробів, у яких резонансні частоти знаходяться в діапазоні частот, відповідному необхідному ступеню жорсткості.

Вібраційна установка повинна забезпечувати отримання в контрольній точці синусоїдальної вібрації з амплітудою прискорення, що відповідає заданому ступеню жорсткості в області резонансних частот виробу.

Випробування проводять в діапазоні частот від  $0,5f_o$  до  $1,5f_o$ , якщо виріб має одну резонансну частоту, або від  $0,5f_{on}$  до  $1,5f_{ov}$ , якщо виріб має більше однієї резонансної частоти в заданому діапазоні частот, але вище верхньої частоти заданого діапазону, де  $f_o$  - резонансна частота виробу,  $f_{on}$  - нижня резонансна частота виробу;  $f_{ov}$  - верхня резонансна частота.

Тривалість впливу вібрації  $T'$  для даного методу визначають за формулою:

$$T' = 2 t_p \frac{T_0}{t_0}$$

де  $t_p$  - час зміни частоти від  $0,5f_o$  до  $1,5f_o$ , або від  $0,5f_{on}$  до  $1,5f_{ov}$ , що визначається за рис. 7.1;

$T_o, t_o$  - загальна тривалість впливу вібрації для методу 1a і розрахунковий час циклу хитання відповідно, що визначаються за таблицею 7.4 для заданого ступеню жорсткості;

Отриманий час  $T'$  при необхідності округлюють до найближчого значення, кратного шести.

Розрахунковий час циклу хитання зменшується відповідно до зміни діапазону частот випробувань.

**7.5.1.5 Метод 1д - випробування методом частоти, що хитається,** з перенесенням діапазону частот випробувань в область резонансних частот.

Даний метод застосовують для виробів, у яких нижча резонансна частота перевищує верхню частоту діапазону, відповідного заданому ступеню жорсткості.

Випробування встановлюють в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ і погоджують їх застосування з замовником.

**7.5.1.6 Метод 1е - випробування на одній фіксованій частоті.** Даний метод застосовують для виробів, у яких нижча резонансна частота більш ніж в 1,5 рази перевищує верхню частоту діапазону, відповідного необхідному ступеню жорсткості.

Вібраційна установка повинна забезпечувати отримання в контрольній точці синусоїдальної вібрації на заданій частоті з амплітудою прискорення відповідного ступеня жорсткості.

Випробування проводять шляхом впливу синусоїдальної вібрації на будь-якій фіксованій частоті діапазону при прискоренні, відповідному заданому ступеню жорсткості.

Конкретне значення частоти повинно вказуватися в стандартах і ТУ на виріб і в ПВ. Загальна тривалість впливу вібрації повинна визначатися таким числом коливань:

- $0,5 \cdot 10^7$  коливань - для ступенів жорсткості I-VII;
- $2 \cdot 10^7$  коливань - для ступенів жорсткості VIII-XII і для випробувань при амплітуді прискорення  $200 \text{ м/с}^2$  (20g) для ступенів жорсткості XIII-XIV;

- $1 \cdot 10^6$  коливань - для ступенів жорсткості XII і XIV при амплітуді прискорення  $400 \text{ м/с}^2$  (40g) при кожному напрямку впливу. Випробувальний режим встановлюють в контрольній точці за показаннями засобів вимірювання.

### **7.5.2 Випробування методом фіксованих частот у всьому діапазоні**

Даний метод допускається застосовувати за погодженням із замовником, якщо неможливе застосування інших методів.

Випробування проводять шляхом впливу синусоїдальної вібрації при плавній зміні частоти в межах третьоктавних піддіапазонів частот з витримкою протягом встановленого часу на межах третьоктавних піддіапазонів.

Третьоктавні піддіапазони частот вибирають з наступного ряду частот: 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000 Гц.

Випробування проводять, починаючи з верхньої частоти діапазону частот відповідного ступеню жорсткості.

На верхній частоті діапазону частот випробувань проводять витримку, потім в межах кожного піддіапазону плавно змінюють частоту від верхньої до нижньої протягом 1 хв., і протягом часу, що залишився для третьоктавного піддіапазону частот, витримують на нижній частоті кожного піддіапазону.

Якщо верхня межа діапазону частот не збігається з однією з вищевказаних третьоктавних частот, то її округлюють до найближчої більшої частоти третьоктавного ряду.

Загальна тривалість впливу вібрації по всьому діапазону частот і загальна тривалість впливу вібрації в кожному третьоктавному піддіапазоні частот наведені в таблиці 7.7.

Значення амплітуди переміщення, амплітуди прискорення і діапазону частот випробувань вибирають для відповідного ступеню жорсткості з таблиці 7.5.

При проведенні випробування для виробів з власними амортизаторами слід уникати збігу частоти, на якій проводять витримку, з резонансною частотою амортизатора.

Таблиця 7.7 - Режими випробувань на віброміцність методом фіксованих частот у всьому діапазоні

Ступінь жорсткості	Загальна тривалість впливу вібрації по всьому діапазону частот, год.		Загальна тривалість впливу вібрації в кожному третьоктавному піддіапазоні частот	
	тривалого, год.	коротко-часного, хв.	тривалого, год.	коротко-часного, хв.
I	7	-	1.0	-
II-IV	9	1.5	1.0	10
V-VI	25	6	2.5	36
VII	26	6.5	2.0	30
VIII	28	7	2.0	30
IX-X	72	6	4.0	20
XI-XII	36	6	1.5	15

### 7.5.3 Випробування шляхом впливу широкопasmової випадкової вібрації

Цей метод застосовують для випробування виробів, що мають в заданому діапазоні частот не менше 4 резонансів, якщо до виробів пред'явлена вимога з міцності до впливу випадкової вібрації.

Конкретний метод випробувань вказується в стандартах і ТУ на виріб і в ПВ. Значення резонансних частот при виборі методу випробувань приймають на підставі вимірів на стадії розробки і за довідковими даними.

Випробування проводять шляхом впливу на виріб широкопasmової випадкової вібрації в режимах, зазначених у табл. 7.8.

При заміні випробування на широкопasmову випадкову вібрацію випробуванням на синусоїдальну вібрацію замість ступенів жорсткості I і II використовують ступені жорсткості XI і XII з табл. 7.5 відповідно, а замість ступенів жорсткості II ті IV використовують ступінь жорсткості XIV.

Якщо нижча резонансна частота виробу знаходиться вище 200 Гц, то випробування проводять, починаючи від 100 Гц.

Таблиця 7.8 - Режими випробувань на віброміцність шляхом впливу широкосмугової випадкової вібрації

Ступінь жорсткості випадкової вібрації	Діапазон частот, Гц	Середнє квадратичне значення прискорення, $m/s^2$ (g)	Спектральна щільність прискорення, $g^2/Гц$	Загальна тривалість впливу вібрації, год.
I	20-2000	100(10)	0,05	3,00
II	20-2000	200(20)	0,20	3,00
III	20-5000	300(30)	0,20	0,05
	20-2000	200(20)	0,20	3,00
IV	20-5000	500(50)	0,50	0,05
	20-2000	200(20)	0,20	3,00

Випробування на вібростійкість та віброміцність проводять на спеціальному обладнанні - вібростендах.

На рис. 7.2 наведений зовнішній вигляд вібростенду TV 51110 (100 Н) виробництва TIRA GmbH (Німеччина) [22].



Рисунок 7.2 - Вібраційний стенд TV 51110 виробництва TIRA GmbH (Німеччина)

Вібростенд TV 51110 (100 Н) являє собою вібратор на постійних магнітах, які можна використовувати в якості як мобільних, так і стаціонарних систем для імітації вібрацій навколишнього середовища. Міцна конструкція забезпечує тривалий термін служби.

Основні технічні характеристики:

- номінальна максимальна сила, Н (синус./випадк.)	100/70
- діапазон частот, Гц	2...7000
- максимальна швидкість, мм/с (синус./випадк.)	1,5/1,5
- максимальне прискорення, g (синус./випадк.)	45/30
- основна резонансна частота, Гц	> 6500
- маса, кг	12

У табл. 7.9 наведені типи та технічні характеристики вібраційних установок виробництва СНД, які все ще застосовуються на вітчизняних підприємствах радіоелектронної промисловості.

Таблиця 7.9 - Технічні характеристики вібраційних установок виробництва СНД

Тип вібраційної установки	Номінальна маса виробу, кг	Макс. прискорення з номін. навантаженням, м/с <sup>2</sup>	Макс. переміщення, мм	Сила поштовху, Н	Діапазон частот, Гц	Частота першого ВЧ резонансу, кГц
1	2	3	4	5	6	7
УВЕ-0,5/10000 100М	0,5	1000	6	1750	5-10000	4,5
УВЕ-1/5000	1,0	3000	2	1200	50-5000	3,5
УВЕ-1/10000	1,0	400	6	1200	5-10000	4,9

Продовження табл. 7.9

1	2	3	4	5	6	7
УВЕ-5/10000	5,0	300	7,5	3300	5-10000	4,0
УВЕ-10/5000	10,0	450	5	16000	5-5000	2,0
УВЕ-50/5-5000	50,0	250	10	20000	5-5000	1,9
УВГН-30/300-20	30,0	100	10	4000	5-300	-
ВЕДС-10-1А	1,9	400	6	10	5-5000	-
ВЕДС-100Б	22,0	400	7,5	100	5-5000	-
ВЕДС-200А	45,0	450	12,5	200	5-5000	-
ВЕДС-1500	500	450	6	1500	5-5000	-

Для випробувань бортової апаратури часто застосовуються спеціальні *стенди Скорсбі* для імітації тривісної хитавиці.

Класичний випробувальний стенд Скорсбі морського приладобудування - це горизонтальна платформа з об'єктом випробування, яка знаходиться у тривісному кардановому підвісі. Кожна з осей карданова підвісу імітує хитавицю корабля за кутами рискання, кільової і бортової хитавиці. У цапфах осей карданова підвісу розташовані реверсивні двигуни, які керуються незалежно один від одного, що дозволяє задавати параметри хитавиці окремо за кожною віссю, наприклад:

- бортова хитавиця з амплітудою  $(5\pm 1)^\circ$  і періодом  $(15\pm 1)$  с;
- кільова хитавиця з амплітудою  $(5\pm 1)^\circ$  і періодом  $(6\pm 1)$  с.

В авіаційній промисловості стенди Скорсбі імітують коливання літального апарату за кутами рискання, крену і тангажу. Вони використовуються к стандартне устаткування для проведення випробувань інерційних чутливих елементів і бортової авіоніки.

На рис. 7.3 наведений зовнішній вигляд стенду Скорсбі моделі 9790-BVR виробництва компанії "Ideal Aerosmith" (США) [11].



Рисунок 7.3 - Стенд Скорсбі моделі 9790-BVR виробництва компанії "Ideal Aeromath" (США)

Стенд призначений для випробувань гіроскопічних приладів, а також датчиків руху, які використовуються в різних областях техніки. Він має лічильник циклів коливань, що дозволяє змінювати кількість циклів від 1 до 99.

Основні технічні характеристики:

- параметри хитавиці, циклів/хв.	3...60
- точність, циклів/хв.	0,1
- значення кутів хитавиці, град.	0,5; 10; 15
- температурний діапазон, °С	0...54
- габарити об'єкту випробувань, мм	762x610x1034
- вага об'єкту випробувань, кг	227

Конструкції та основні параметри сучасних випробувальних вібраційних установок можна також глянути у [21], [22], [23], [28], [29]. Складові частини обладнання для випробувань на вібростійкість та віброміцність і принципи його дії розглянути детальніше у розд. 8.

## 7.6 Випробування на ударну міцність і стійкість

### 7.6.1 Випробування на ударну міцність (метод 104)

Зазвичай ударні навантаження виникають спільно з іншими видами механічних навантажень і відрізняються від них імпульсним характером і короткочасністю дії.

Мета випробувань на ударні навантаження:

- перевірка здатності виробів протистояти руйнівній дії ударних навантажень і, якщо необхідно, виконувати свої функції в процесі і після впливу ударів;
- оцінка конструктивної міцності виробів;
- демонстрація можливості застосування виробів в умовах впливу ударних навантажень.

Таким чином, випробування проводять з метою перевірки здатності виробу протистояти руйнівній дії механічних ударів багаторазової дії та зберігати після цього свої параметри в межах значень, вказаних в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ.

Випробувальна установка повинна забезпечувати отримання механічних ударів багаторазової дії з амплітудою прискорення, відповідною заданому ступеню жорсткості.

Випробування проводять шляхом впливу механічних ударів багаторазової дії. Значення пікового ударного прискорення і загальна кількість ударів повинні відповідати зазначеним у таблиці 7.10.

Тривалість дії ударного прискорення вибирають з таблиці 7.11 в залежності від значення нижчої резонансної частоти виробу.

Якщо технічні характеристики обладнання не забезпечують необхідної тривалості дії ударного прискорення, то допускається проведення випробувань з тривалістю дії ударного прискорення, яка визначається за формулою:

$$\tau \geq \frac{300}{f_{он}}$$

де:  $\tau$  - тривалість ударного прискорення, мс;  
 $f_{он}$  - нижча резонансна частота виробу, Гц.

Таблиця 7.10 - Режими випробувань на ударну міцність і стійкість

Ступінь жорсткості	Пікове ударне прискорення, м/с <sup>2</sup> (g)	Загальна кількість ударів для передбаченої в стандартах і ТУ на виробі вибірки	
		3 шт. і менше	більше 3 шт.
I	150(15)	12000	10000
II	400(40)	12000	10000
III	750(75)	6000	4000
IV	1500(150)	6000	4000

Таблиця 7.11 - Тривалість дії ударного прискорення при випробуваннях на ударну міцність і стійкість

Значення нижчої резонансної частоти виробу, Гц	Тривалість дії ударного прискорення, мс
60 і нижче	18±5
60...100	11±4
100...200	6±2
200...500	3±1
500...1000	2±0,5
Понад 1000	1±0,3

Якщо у конструкції виробу вбудовані елементи захисту (наприклад амортизатори), то при виборі тривалості дії ударного прискорення враховують нижчу резонансну частоту самого виробу, а не елементів захисту.

Якщо резонансні частоти виробів не встановлені, то тривалість дії ударного прискорення вказують в ТУ на виробі і в ПВ.

Форма ударного імпульсу є однією з найважливіших характеристик, що забезпечують єдність випробувань, та регламентується в ТУ.

Найнебезпечнішим для виробів є трапецеїдальний імпульс, оскільки він має найбільш широку область квазірезонансного збудження і найбільший коефіцієнт динамічності в цій області.

Пилкоподібний імпульс дозволяє досягти найкращої відтворюваності випробувань, проте отримати ударний імпульс такої форми важче, ніж імпульс іншої форми.

На практиці при випробуваннях найчастіше використовують напівсинусоїдальний ударний імпульс, формування якого найпростіше і вимагає найменших витрат.

Випробування проводять при частоті проходження 40...120 ударів в хвилину.

Допускаються перерви в випробуванні, тривалість яких не обмежується, але при цьому загальна кількість ударів повинна зберігатися.

Випробування проводять шляхом дії ударів по черзі в кожному з трьох взаємно перпендикулярних напрямків по відношенню до виробу. При цьому загальна кількість ударів має рівномірно розподілятися між напрямками, за якими проводять випробування.

### **7.6.2 Випробування на ударну стійкість (метод 105)**

Випробування проводять з метою перевірки здатності виробів виконувати свої функції в умовах дії механічних ударів багаторазової дії.

Випробування проводять під електричним навантаженням, характер, параметри і метод контролю якого встановлюються в стандартах і ТУ на виріб і в ПВ.

Випробування проводять шляхом впливу ударів по черзі в кожному з трьох взаємно перпендикулярних напрямках по відношенню до виробу.

Тривалість дії пружного прискорення вибирають з таблиці 7.11.

Виріб піддають впливу 20 ударів за кожним напрямком впливу, при цьому частота проходження ударів повинна забезпечувати можливість контролю параметрів виробу.

У процесі випробування проводять контроль параметрів виробів, значення і методи перевірки яких вказують в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ.

Для перевірки ударної стійкості рекомендується вибирати параметри, за зміною яких можна судити про ударну стійкість виробу в цілому (наприклад, рівень віброшумів, спотворення вихідного

сигналу або зміна його значення, цілісність електричної мережі, нестабільність контактного опору і т.д.).

При суміщенні випробування на ударну стійкість з випробуванням на ударну міцність кількість ударів повинна відповідати зазначеній в таблиці 7.10. Контроль параметрів виробів проводять в кінці випробування на ударну міцність при впливі не менше 20 ударів для кожного напрямку дії.

### **7.6.3 Випробування на вплив одиночних ударів (метод 106)**

Випробування проводять з метою перевірки здатності виробів протистояти руйнівній дії механічних ударів одиночної дії і виконувати свої функції після впливу ударів, а також (якщо це зазначено в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ) виконувати свої функції або не допускати помилкових спрацьовувань в процесі впливу ударів.

Випробувальна установка повинна забезпечувати отримання механічних ударів одиночної дії з амплітудою прискорення, що відповідає заданому ступеню жорсткості.

Якщо в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ вказана необхідність контролю параметрів виробів в процесі випробування, то випробування проводять під електричним навантаженням.

Конкретну форму імпульсу ударного прискорення встановлюють в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ. Рекомендується напівсинусоїдальна форма імпульсу ударного прискорення. Значення пікового ударного прискорення вибирають в залежності від ступеня жорсткості за таблицею 7.12. Значення тривалості дії ударного прискорення з напівсинусоїдальною формою - імпульсу ударного прискорення - вибирають в залежності від нижчих резонансних частот виробів з таблиці 7.13 для ступенів жорсткості IV і вище, а для ступенів жорсткості I-III тривалість дії ударного прискорення вибирають з таблиці 7.11.

Вироби, нижча резонансна частота яких перевищує 2000 Гц, допускається випробувати при ударних прискореннях 5000, 10000 і 15000 м/с<sup>2</sup> (500, 1000 і 1500 g) при тривалості дії ударного прискорення 1,5; 1,0 та 0,5 м/с<sup>2</sup> відповідно.

Таблиця 7.12 - Режими випробувань на одиночний удар

Ступінь жорсткості	Пікове ударне прискорення, $\text{м/с}^2$ (g)	Ступінь жорсткості	Пікове ударне прискорення, $\text{м/с}^2$ (g)
I	200 (20)	VIII	30000 (3000)
II	1000 (100)	IX	50000 (5000)
III	1500 (150)	X	100000 (10000)
IV	2000 (200)	XI	200000 (20000)
V	5000 (500)	XII	500000 (50000)
VI	10000 (1000)	XIII	1000000
VII	15000 (1500)		

Електричні вироби з масою більше 2 кг допускається випробувати при прискоренні  $10000 \text{ м/с}^2$  (1000 g). При цьому тривалість дії і форму імпульсу ударного прискорення не контролюють.

Таблиця 7.13 - Тривалість дії ударного прискорення при випробуванні на одиночний удар

Значення нижчих резонансних частот виробів, Гц	Тривалість дії ударного прискорення, мс
500 і вище	$3 \pm 1$
500...1000	$2 \pm 0,5$
1000...2000	$1 \pm 0,3$
2000...5000	$0,5 \pm 0,2$
5000...10000	$0,2 \pm 0,1$
10000...20000	$0,1 \pm 0,05$
20000 і вище	$0,05 \pm 0,02$

Якщо резонансні частоти виробів не встановлені, то тривалість дії ударного прискорення вказують в стандартах і ТУ на виріб і ПВ.

Тривалість дії ударного прискорення  $\tau$  для ударного прискорення з трапецеїдальною та пилкоподібною формами імпульсу вибирають відповідно за формулами:

$$\tau_{\tau} = \frac{n_i \cdot 100}{f_{он}} ; \quad \tau_{\pi} = \frac{300}{f_{он}}$$

де значення  $n_i$  вибирають в діапазоні від 3 до 100;  
 $f_{он}$  - значення найнижчої резонансної частоти виробу, Гц.

Отримані за цими формулами значення  $\tau$  округлюють (в будь-яку сторону) до найближчих значень за таблицями 7.11 та 7.13.

Випробування проводять шляхом впливу ударів по черзі в кожному з двох протилежних напрямків за трьома взаємно перпендикулярними вісями виробу (6 напрямків), якщо у виробу неможливо виділити площині і вісі симетрії. В інших випадках вибір конкретних напрямків впливу проводиться наступним чином:

- при наявності вісі симетрії випробування проводять уздовж вісі симетрії в двох протилежних напрямках і в будь-якому напрямку, перпендикулярному до вісі симетрії;
- при наявності однієї або декількох площин симетрії напрямок впливу вибирають так, щоб перпендикулярно до кожної площини симетрії випробування проводилося в одному напрямку.

Вироби, у яких відомий один найбільш небезпечний напрям впливу, випробування проводять тільки в цьому напрямку.

Конкретне число напрямків впливу вказують в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ.

Незалежно від кількості обраних напрямків впливу пікового ударного прискорення в кожному напрямку виконують три удари.

Параметри, що перевіряються, їх значення і методи перевірки вказують в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ.

Випробування на ударну стійкість та міцність проводять на спеціальному обладнанні - ударних стендах.

На рис. 7.4 наведений зовнішній вигляд гідравлічного ударного стенда SY10-200 виробництва Dongling Technologies (США) [22].



Рисунок 7.4 - Гідравлічний ударний стенд SY10-200 виробництва Dongling Technologies (США)

Ударний стенд SY10-200 призначений для імітації ударної дії на різні зразки та вироби.

#### Основні технічні характеристики

- максимальне навантаження, кг	200
- розміри стола, мм	600x600
- ударне прискорення, $m/c^2$ (напівсинус. форма)	100...8000
- тривалість імпульсу, мс (напівсинус. форма)	40...1,5
- габарити, мм	1400x1100x2700
- маса, кг	3800

У табл. 7.14, 7.15 наведені типи та технічні характеристики ударних стендів виробництва СНД, які все ще застосовуються на вітчизняних підприємствах радіоелектронної промисловості.

Конструкції та основні параметри сучасних ударних стендів можна також глянути у [21], [22], [23], [28], [29]. Складові частини обладнання для випробувань на ударну стійкість та міцність і принципи його дії розглянуті детальніше у розд. 8.

Таблиця 7.14 - Технічні характеристики установок для випробувань на вплив багаторазових ударів виробництва СНД

Тип установки	Вантажопідйомність, кгс	Кількість ударів, 1 / хв..	Максимальне прискорення, g	Тривалість удару, мс	Принцип роботи	Розміри стола, мм
УУ-500/150	500	20-120	150	40	М*	120x120
УУ-5/1000	5	5-80	1000	1,5-20	М	210x250
СУ-1	50	5-80	150	1,5-12	М	285x452
ТТ-50/500	50	10-120	500	0,6-20	М	-
УУЕ-2/200	3	20-80	200	1,5-12	ЕД**	Ø160
УУЕ-20/20	20	5-80	500	1,5-40	ЕД	Ø300
УУЕ-1/6000	1	5	6000	0,1-1,0	ЕД	Ø80

\* - механічний

\*\* - електродинамічний

Таблиця 7.15 - Технічні характеристики установок для випробувань на вплив одиночних ударів виробництва СНД

Тип установки	Вантажопідйомність, кгс	Максимальне прискорення, g	Тривалість удару, мс	Принцип роботи	Розміри стола, мм
К-20/1000	20	1000	0,5-10	вільн.падіння	300x300
К-5/1000	5	1000	0,5-10	вільн.падіння	150x150
К-0,1/10000	0,1	10000	0,12-0,1	вільн.падіння	Ø50
К-0,1/30000	0,1	30000	0,12-0,08	вільн.падіння	Ø50
К-5/3000	5	3000	0,4-11	пневматичн.	Ø235
К-2/3000	2	3000	0,4-11	пневматичн.	Ø140

## 7.7 Випробування на вплив лінійного прискорення (метод 107)

Випробування проводять з метою перевірки здатності виробів протистояти руйнівній дії лінійного прискорення і виконувати функції в процесі його впливу, якщо це зазначено в стандартах і ТУ на вироби і ПВ, а також для перевірки структурної міцності виробу в процесі виробництва.

Випробування проводять на центрифугі, яка повинна забезпечувати отримання лінійного (доцентрового) прискорення, значення якого відповідає необхідному ступеню жорсткості.

Випробування проводять шляхом впливу лінійного прискорення, значення якого має відповідати одному із зазначених в таблиці 7.16.

Прискорення встановлюють за показниками засобів вимірювання з допустимим відхиленням  $\pm 10\%$  від заданого значення прискорення.

Таблиця 7.16 - Режими випробувань на лінійне прискорення

Ступінь жорсткості	Лінійне прискорення, м/с <sup>2</sup> (g)	Ступінь жорсткості	Лінійне прискорення, м/с <sup>2</sup> (g)
I	100(10)	VIII	20000(2000)
II	200(20)	IX	50000(5000)
III	500(50)	X	100000 (10000)
IV	1000(100)	XI	200000 (20000)
V	2000(200)	XII	300000 (30000)
VI	5000(500)	XIII	500000 (50000)
VII	10000(1000)	XIV	1000000 (100000)

Час розгону або гальмування центрифуги  $\tau_L$  в секунду повинен задовольняти умовам:

$$\tau_L \geq 0,3 \cdot \sqrt{\frac{R}{j}} \quad \tau_L \geq \frac{100}{n}$$

де  $j$  - лінійне прискорення, g;

$R$  - відстань від центру обертання центрифуги до контрольної точки, см;

$n$  - частота обертання платформи центрифуги, об. / хв.

Тривалість випробування - 3 хв. в кожному напрямку при випробуванні з прискоренням до  $5000 \text{ м/с}^2$  (500 g), якщо більший час не потрібний для контролю і виміру параметрів виробів.

У процесі випробування, якщо вказано в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ, проводять контроль параметрів виробів, їх значення і методи перевірки вказують в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ.

Випробування на лінійні прискорення проводять з використанням спеціального обладнання - центрифуг. На рис. 7.5 наведений зовнішній вигляд центрифуги випробувальної SY31-200 виробництва DongLing Technologies (США) [22].



Рисунок 7.5 - Центрифуга випробувальна SY31-200 виробництва DongLing Vibration (США)

Випробувальна центрифуга постійного прискорення SY31-200 призначена для перевірки зразків на вплив лінійних перевантажень при постійному прискоренні.

Основні технічні характеристики:

- максимальне навантаження, кг/позицій	200/2
- діапазон прискорень, м/с <sup>2</sup>	30..700
- розміри зразка, мм	600x600x600
- максимальний радіус зразка, мм	3200
- радіус обертання, мм	3500
- час безперервної роботи, хв.	60
- габарити, мм	∅8500
- маса, кг	10000

Для комплексних випробувань на статичні та динамічні прискорення використовують спеціальне обладнання - віброфуги. На рис. 7.6 наведений зовнішній вигляд віброфуги У67-АН виробництва компанії ACTIDYN SYSTEMES (Франція) [11].

Складові частини обладнання для випробувань на лінійні прискорення і принципи його дії розглянуті детальніше у розд. 8.



Рисунок 7.6 - Віброфуга У67-АН виробництва компанії ACTIDYN SYSTEMES (Франція)

Основні технічні характеристики:

- максимальне навантаження, кг	120
- діапазон прискорень, м/с <sup>2</sup>	50...800
- розміри зразка, мм	600x600x600
- максимальний радіус зразка, мм	4000
- радіус обертання, мм	4650
- кутова швидкість, об/хв.	30...135
- діапазон частот, Гц	10...20000
- габарити, мм	∅4650

## 7.8 Випробування на вплив акустичного шуму (метод 108)

Випробування проводять з метою визначення здатності виробів виконувати свої функції і зберігати свої параметри в межах норм, зазначених в стандартах і ТУ на вироби і ПВ, в умовах впливу підвищеного акустичного шуму.

Випробування проводять одним з наступних методів:

- метод 1 - випробування шляхом впливу на виріб випадкового акустичного шуму;
- метод 2 - випробування шляхом впливу на виріб акустичного тону мінливої частоти.

### 7.8.1 Випробування на вплив випадкового акустичного шуму

Випробувальна установка повинна забезпечувати отримання випадкового акустичного шуму в діапазоні частот 10000 Гц при рівні звукового тиску, відповідному необхідному ступеню жорсткості.

Випробування проводять у ревербераційній акустичній камері. Найкращою є камера у вигляді неправильного п'ятикутника з розмірами, зазначеними на рис. 7.7.

Значення розміру  $n$  повинне перевищувати найбільший габаритний розмір виробу не менше ніж в два рази і вибиратися з наступного ряду: 0,5; 1,25; 3 м.

Кріплення виробів або пристосувань з виробами проводять в робочій зоні камери на еластичних розтяжках (гумові шнури, смуги тощо).

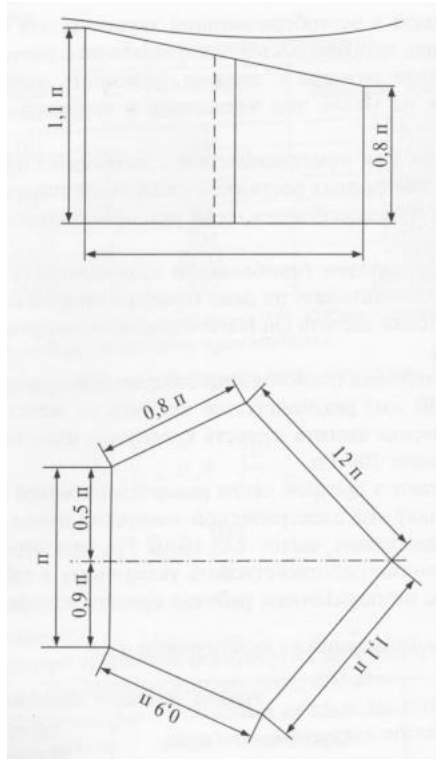


Рисунок 7.7 - Схема ревербераційної камери

Резонансна частота пристосування, якщо воно застосовується, повинна бути не нижче 15 кГц.

Великогабаритні вироби (найбільший габаритний розмір більше 300 мм) рекомендується встановлювати на рамі (столі) з опорою на 3-4 амортизатора, при цьому резонансна частота системи «виріб - амортизатори» не повинна перевищувати 25 Гц.

Малогабаритні вироби (найбільший габаритний розмір в закріпленому стані менше 40 мм) рекомендується кріпити на пристроях, при цьому нижча резонансна частота засобів кріплення виробів повинна бути не нижче 15 Гц і не вище 200 Гц. Вироби встановлюють в середній частині ревербераційної камери.

Випробування проводять під електричним навантаженням шляхом впливу акустичного шуму в діапазоні частот 125...10000 Гц,

при цьому рівень звукового тиску повинен відповідати зазначеному в таблиці 7.17 з допустимим відхиленням за показаннями робочих засобів вимірювань  $\pm 3$  дБ.

Рівні звукового тиску, виміряні в третьоктавних смугах частот, а також допустимі відхилення повинні відповідати вказаним у табл. 7.17 для відповідних ступенів жорсткості. Тривалість дії звукового тиску повинна дорівнювати 5 хв., якщо більший час не потрібен для контролю і виміру параметрів виробів.

У процесі випробування проводять контроль параметрів виробів, їх значення і методи перевірки вказуються в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ.

Таблиця 7.17 - Режими випробувань на акустичний шум

Ступінь жорсткості	Рівень звукового тиску, дБ	
	акустичного шуму	акустичного тону мінливої частоти
I	130	120
II	140	130
III	150	140
IV	160	150
V	170	160

Рекомендується вибирати такі параметри, за зміною яких можна судити про стійкість виробу до впливу акустичного шуму виробу в цілому (наприклад, рівень віброшумів, спотворення вихідного сигналу або зміна його значення, цілісність електричної мережі, зміна контактного опору і т.ін.).

### **7.8.2 Випробування на вплив акустичного тону мінливої частоти**

Випробувальна установка повинна забезпечувати отримання акустичного тону мінливої частоти в діапазоні частот 125...10000 Гц при рівні звукового тиску, відповідному необхідному ступеню жорсткості.

Випробування проводять під електричним навантаженням шляхом впливу тону мінливої частоти в діапазоні частот 200...1000 Гц.

Рівень звукового тиску повинен відповідати зазначеному в таблиці 7.17 (на частотах нижче 200 і вище 1000 Гц повинно бути зниження, що дорівнює 6 дБ на октаву щодо рівня на частоті 1000 Гц).

Випробування проводять при плавній зміні частоти по всьому діапазону від нижчої до вищої і назад (один цикл) протягом 30 хв., якщо більший час не потрібен для контролю параметрів виробів.

В процесі випробувань проводять контроль параметрів виробів.

## **8 ДАТЧИКИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ПРИНЦИПИ ДІЇ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ**

### **8.1 Перетворювачі механічних навантажень**

#### **8.1.1 Призначення перетворювачів механічних навантажень**

Перетворювачі механічних навантажень є однією з основних частин обладнання для механічних випробувань. Вони являють собою спеціальні пристрої для сприйняття реакції механічної системи (датчики), перетворення її у електричну або електромагнітну енергію та передачі на вимірювальні та реєструючі пристрої.

У місці установки датчика виникає механічне навантаження (сила), що протидіє механічному навантаженню (силі), яке треба виміряти (сила реакції датчика).

Конструкція датчиків механічних навантажень мірою визначається застосуванням перетворювачем. Для досягнення оптимальних метрологічних характеристик датчика необхідно дотримуватися наступних принципів: цілісність конструкції, інтегрування, симетрія і оптимальні конструктивні границі.

Перетворювачі механічних напружень застосовуються у спеціальному обладнанні для механічних випробувань (вібро- та ударних стендах, обладнанні для випробувань на лінійні прискорення) для вимірювань параметрів вібрацій та ударів, які діють на РЕЗ, що випробуються [19].

#### **8.1.2 Класифікація перетворювачів механічних навантажень**

За способом створення реакції можна виділити датчики трьох типів:

- *з електрично неактивним пружним елементом*, у якому реакція створюється в результаті деформації пружного електрично неактивного елемента - *датчик роздільного перетворення*;
- *з електрично активним пружним елементом*, у якому реакція створюється деформацією пружного електрично активного,

тобто одночасно чутливого елемента, - *датчик суміщеного перетворення*;

- *з силовим урівноваженням*, у якому реакція створюється пристроєм, що збуджує силу - механічним або електромеханічним.

До датчиків першого типу відносяться найбільш поширені в даний час датчики, у яких пружний елемент виконує чисто механічні функції - створює реакцію вимірюваному навантаженню. Деформація, що виникає у пружному елементу внаслідок дії навантаження, сприймається чутливим елементом і перетворюється в вихідну величину, тобто процеси деформування і перетворення відбуваються в різних елементах датчика.

До датчиків цього типу відносяться, наприклад, датчики з механічними, тензорезисторними, індуктивними або ємнісними перетворювачами деформації в електричний сигнал.

У датчиків другого типу механічне навантаження діє на електрично або магнітно активний пружний елемент, який реагує на створене навантаженням поле механічного напруження або деформацію зміною своїх електричних або магнітних характеристик. До датчиків цього типу відносять, наприклад, вугільні, п'єзоелектричні і магнітоанізотропні датчики.

До датчиків третього типу відносять датчики з електродинамічним врівноважувачим пристроєм, що збуджує силу. У датчиків цього типу електричне живлення збуджувача сили ланцюгом управління збільшується настільки, що деформація пружного елемента в першому наближенні усувається, тобто сила, що вимірюється, врівноважується силою збуджувача, а електричне живлення збуджувача сили є мірою вимірюваної сили. Датчики цього типу застосовуються переважно при вимірюванні малих і дуже малих навантажень.

**За потребами у додаткових джерелах енергії** перетворювачі, що використовуються у *датчиках першого типу*, можна розділити на *параметричні (модуляторні, активні)* та *генераторні (пасивні)*.

У параметричних перетворювачах енергія, що віддається в вимірювальний ланцюг у вигляді вихідної величини, забезпечується допоміжним джерелом живлення.

У генераторних перетворювачах енергія, необхідна для створення вихідної величини, відбирається у вимірюваного об'єкта. У генераторних датчиків постійна електрична потужність може

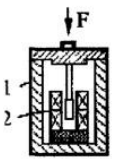
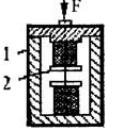
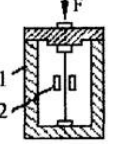
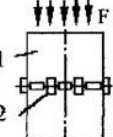
відбиратися тільки тоді, коли джерело сили забезпечує необхідне безперервне живлення. Такий стан можливий лише в тому випадку, коли існують тимчасові зміни вимірюваної сили.

Таким чином, параметричні перетворювачі застосовують в датчиках для вимірювання статичних і динамічних сил, а генераторні - переважно в датчиках для динамічних вимірювань.


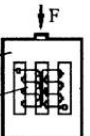


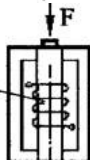
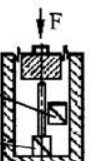
**Датчики другого типу** належать до генераторних.

У табл. 8.1 наведені основні типи датчиків механічних напружень та їх основні параметри [19].

Таблиця 8.1 - Основні типи датчиків механічних напружень

Структурна схема	Датчик	Діапазон вимір. сил, кН	Деформ. пружного елемента, мм	Верхня робоча частота, Гц	Нелінійність %	Клас точн.
1	2	3	4	5	6	7
<b>Параметричний з роздільним перетворенням</b>						
	Індуктивний	$10^3 - 10^4$	0,05-0,50	500	0,1-1,0	0,1-1
	Ємнісний			200		
	Віброчастотний	$0,1 - 5 \cdot 10^4$	0,1-0,25	1000	0,03-0,1	0,01-0,25
	Тензометричний	$10^2 - 5 \cdot 10^4$	0,02-0,3	10000	0,1-2,0	0,4-1

Продовження табл. 8.1

1	2	3	4	5	6	7
Параметричний з сумісним перетворенням						
	Резистивний вугільний	$10^{-1}-10^4$	0,05-0,20	10000	2-30	>10
	Магнітопружний (зміна проник)	$1,0 - 5*10^3$	0,02-0,3	>1000	0.1-2	0.4-2.5
	Магнітопружний (анізотроп.)	$0,5 - 5*10^4$	0,03-0,5	1000	0,05-0,5	0,1-0,6
Генераторний з сумісним перетворенням						
	П'єзоелектр.	$1 - 5*10^2$	0,005-0,5	100000	0,01-1,0	<1
	Магнітопружний	$1 - 10^2$			1-5	2,5-10
Компенсаційний						
	Силовий	$10^{-7}-10^{-2}$	0,1-1	100	0,01	0,025-0,06

На структурних схемах в таблиці 8.1 позначено: 1 - пружний елемент датчика; 2 - перетворювачі деформації пружного елемента в електричний сигнал; 3 - пружний і чутливий елемент датчика; 4 - збуджувач сили.

## 8.2 Тензометри

### 8.2.1 Методи тензометрії

При вимірюванні напружено-деформованих станів деталей і агрегатів при їх експлуатації використовують ряд методів тензометрії, в основу яких покладені різні фізичні принципи вимірювань.

Існують рентгенівські методи, методи фотопружності, муарових смуг, тендітних покриттів, гальванічних покриттів і методи з використанням тензометричних перетворювачів.

Сутність *рентгенівського методу* вимірювання заснована на явищі інтерференції рентгенівських променів, що проходять через кристалічну решітку досліджуваного матеріалу.

В основу *методу тендітних покриттів* покладено ефект утворення тріщин під дією прикладених навантажень. Покриття попередньо наносять на об'єкт дослідження, і після висихання в цьому покритті утворюються залишкові напруження, які і сприяють, навіть при незначних деформаціях, утворенню тріщин. Метод тендітних покриттів застосовують для попереднього визначення зони найбільших напружень. Оскільки похибка визначення деформацій і напружень методом тендітних покриттів досягає 10-20%, цей метод використовують тільки для оціночних вимірів, більш точні результати одержують застосуванням інших засобів високоточного тензометрування.

*Метод гальванічних покриттів* заснований на утворенні темних плям на мідному гальванічному покритті, нанесеному на досліджуваний об'єкт. Цей метод використовують в основному при циклічному навантаженні об'єкта. При відомому числі циклів навантаження, модулі пружності матеріалу об'єкта і хімічний склад гальванічного покриття визначають мінімальне значення напруження, при якому з'являються темні плями на гальванічному покритті. Таким чином, значення кількості циклів навантаження і величина напруги, що відповідають цим циклам навантаження, є взаємопов'язаними величинами.

**Метод фотопружності** заснований на використанні явища подвійного променезаломлення у прозорих матеріалах під дією механічних напружень. При цьому величина подвійного променезаломлення пропорційна значенням деформації об'єкта, яка визначається порядком інтерференційних смуг при просвічуванні матеріалу поляризованим світлом. До переваг методу фотопружності слід віднести можливість вимірювання напруженого стану всієї поверхні об'єкта при візуальному контролі, високу точність вимірювання. Однак вказаний метод має істотний недолік, що полягає в тому, що вимірювання проводять на моделях і це становить певні труднощі при випробуваннях об'ємних моделей.

В основі **методу муарових смуг** лежить муаровий ефект, суть якого полягає в появі темних і світлих смуг, що чергуються при накладенні однієї на іншу двох або більше растрових сіток. Крок муарових смуг визначається параметрами вихідних розчинів і умовами їх освітлення. Один з растрів наносять на випробуваний об'єкт і деформують разом з ним.

Муарова картина несе інформацію про характер деформування растра і деформованого стану зразка. При незначних відносних деформаціях, лінійних і кутових переміщеннях сіток спостерігаються великі зміни кроку, напрямки та положення муарових смуг.

Метод муарових смуг застосовується як для натурних об'єктів, так і для моделей об'єктів. Муарові смуги наносять або за допомогою фотоплівок зі знімним емульсійним шаром або фотохімічним способом шляхом травлення. До переваг методу слід віднести можливість вимірювання деформацій великих поверхонь і при високих температурах.

Схема установки, яка називається муаровою лавою, для вимірювання методом муарових смуг переміщень і деформацій на поверхні деталей або елементів конструкції, випробуваних при статичному, циклічному або динамічному навантаженні в умовах нормальних, підвищених температур або при впливі середовища, наведена на рис. 8.1.

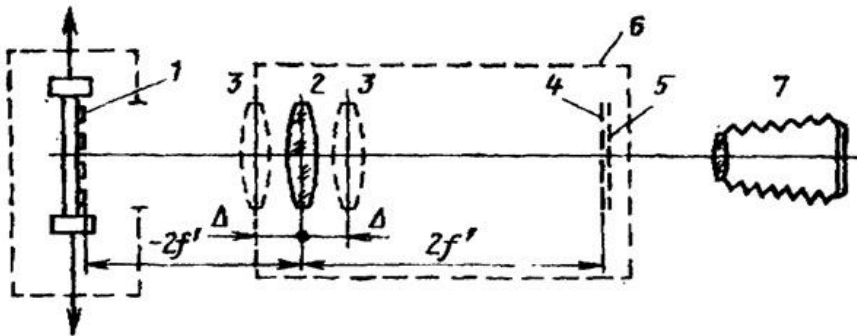


Рисунок 8.1 - Схема муарової лави

Зображення робочого растра, нанесеного на випробувану деталь 1, змонтовану у затискувачах випробувальної машини, проектується об'єктивами 2 і 3 у фокальну площину спеціальної фотокамери 6, де встановлений контрольний растр 5. При поєднанні зображень робочого 4 і контрольного растрів виникає картина муарових смуг, яка реєструється фотокамерою 7.

Застосування такої оптичної системи дозволяє здійснювати вимірювання полів деформацій без зупинки випробувань, причому випробуваний зразок або елемент конструкції може бути розміщений в нагрівальній або кліматичній камері, що має відповідне вікно для спостереження за досліджуваною поверхнею і змонтованої на випробувальній машині. З використанням спеціальних пристосувань, що встановлюються на об'єктиві лави і дозволяють здійснювати тонкі фіксовані переміщення об'єктива, стає можливим ефективно збільшити обсяг одержуваної інформації про переміщення на досліджуваній поверхні.

При вимірюванні полів деформацій за допомогою **методу оптично активних (фотопружних) покриттів** прилади, які використовуються для вимірювання різниці ходу променів в покритті (тобто для вимірювання різниці головних деформацій і для визначення напрямків головних осей), називають полярископами однобічної дії.

Для вимірювання полів малих переміщень точок поверхні матеріалів елементів конструкцій ефективно застосовують **метод**

*голографічної інтерферометрії*, заснований на використанні когерентних джерел світла.

Для дослідження стаціонарних об'єктів і процесів, що протікають повільно, в основному застосовують голографічні установки типів УІГ-2М, УІГ-2А і інтерферометричний стіл для реєстрації швидкоплинних процесів - установку типу УІГ-1М.

Установки зазначених типів зі складними системами антивібраційної ізоляції дозволяють вести дослідження об'єктів як у прохідному, так і у відбитому світлі, вони оснащені оптичними компонентами, необхідними для проведення голографічних досліджень. Разом з тим недостатня стійкість цих установок, громіздкість, значна вартість істотно ускладнюють, а в ряді випадків і виключають їх застосування в комплекті з випробувальними машинами при механічних випробуваннях матеріалів і конструкцій.

Для усунення впливу вібрації і пов'язаної з нею необхідністю використання масивних віброізованих столів застосовують спеціалізовані *голографічні методи* з лазерами безперервного випромінювання або імпульсними. Застосування голографії з імпульсним лазером з дуже малою тривалістю імпульсу (20-30 нс) дозволяє усунути вплив вібрації як при голографії за допомогою одиночного імпульсу, так і при роботі за схемою з двома експозиціями. Так, при одиночному імпульсі тривалістю близько 30 нс швидкість руху об'єкта не повинна перевищувати 2,9 м/с, а інтервал між парними імпульсами, що не перевищує 50 мкс, забезпечує усунення впливу вібрацій при частотах до 2000 Гц.

У випадках, коли з яких-небудь причин доцільно використовувати не імпульсні системи, а установки з лазером безперервного випромінювання, застосовують різні методи компенсації вібрацій, які умовно можна поділити на три основні класи: *методи з використанням локального опорного пучка*, який формується випромінюванням, що розсіюється об'єктом; *методи використання сервосистем зі зворотним зв'язком* і *методи, що знижують час експозиції*.

Система для автоматичного контролю деформацій на основі використання голографічного інтерферометра з оптоелектронним перетворювачем призначена для управління процесом дифузійного зварювання з одночасним дефектоскопічним контролем, а також може бути використана для механічних випробувань із заданими швидкостями і величинами деформацій при навантаженнях зразків в

термо-, кріокамерах або вакуумних камерах. Принципова схема пристрою представлена на рис. 8.2.

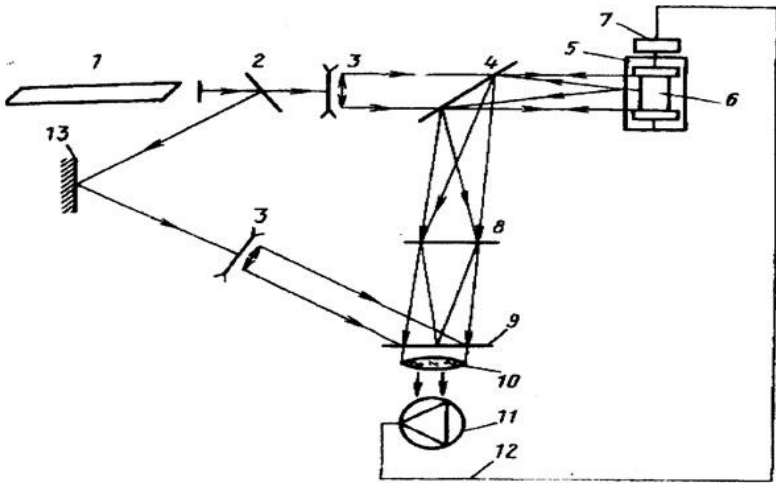


Рисунок 8.2 - Схема установки для автоматичного контролю деформацій на основі інтерферометра

Випромінювання лазера 1 розділяється світлоділником 2 і дзеркалом 13 на два потоки, які розширюються і колімуються системами 3. Більш яскравий потік, проходячи через пластинку 4, потрапляє в камеру 5. Відбиваючись від поверхні зразка 6, пучок виходить з камери тим же оптичним шляхом і через об'єтив 8 потрапляє на фотопластинку 9, де записується голограма. Світловий потік, що потрапляє в процесі навантаження на оптоелектронний перетворювач через лінзу 10, попередньо проходить через голографічну інтерферографу і виявляється модульованим просторовою частотою, локалізацією і формою інтерференційних смуг. У блоці порівняння відбувається зіставлення заданої і реалізованої швидкостей зміни фотоструму, тобто заданої і вимірюваної швидкостей деформування. При нерівності швидкостей виникає сигнал неузгодженості, що надходить через лінію зворотного зв'язку 12 в блок управління золотником гідравлічного навантажувального пристрою 7, і здійснюється автоматичне корегування параметрів процесу навантаження.

## 8.2.2 Тензометричні перетворювачі

Для вимірювання тиску найбільшого поширення набули тензометри, засновані на використанні **тензометричних перетворювачів**: механічні, оптичні, пневматичні, струнні (акустичні) і електричні.

**Механічні тензометри** зазвичай використовують для попередньої оцінки розподілу деформацій на об'єкті.

В **оптичних тензометрах** для перетворення деформацій в зручну для реєстрації величину використовують оптичний промінь. При цьому відлік можна проводити за переміщенням світлової плями на шкалі.

У оптичних тензометрах, які призначені для вимірювання великих деформацій, використовують фотоелектричні датчики. При цьому деформація перетворюється в електричний імпульс. Схема оптичного тензометра з фотодіодами наведена на рис. 8.3.

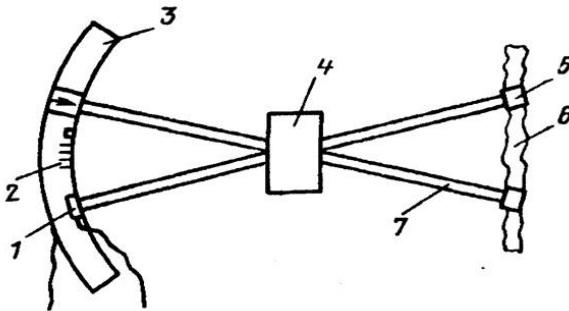


Рисунок 8.3 - Схема оптичного тензометра з фотодіодом

Важелі 7, вісь обертання яких знаходиться в корпусі тензометра 4, закріплені на зразку 6 затискувачами 5. На одному з важелів закріплена голівка, що зчитує 7, в якій розміщені джерело світла і фотодіод, а на іншому важелі - прозора шкала 3 зі штрихами 2.

При деформації об'єкта голівка, що зчитує, переміщається уздовж шкали, а з фотодіода надходять на вторинну апаратуру імпульси, кількість яких пропорційна деформації. Точність вимірювання залежить від кількості поділів на шкалі, тому габарити

такого пристрою досить великі, оскільки треба збільшувати довжину важелів і розміри шкали.

Дія *пневматичного тензометра* заснована на зміні витрат повітря через вимірювальне сопло. Перепад тиску вимірюють за допомогою U-подібного водяного манометра. Деформація поверхні досліджуваного об'єкта сприймається опорними призмами і через важіль механічної передачі змінює величину перетину сопла. Коефіцієнт передачі пневматичного тензометра досягає 200 000. Лінеаризація градууювальної характеристики забезпечується диференціальним включенням двох вимірювальних сопел, встановлених зустрічно і розділених діафрагмою. До недоліків даних тензометрів відносять підвищені вимоги до чистоти повітряних потоків, тому їх застосовують в основному для лабораторних вимірювань.

У *струнних (акустичних) тензометрів* використовується зміна частоти власних коливань струни при деформації об'єкта. Власна частота коливань струни залежить від величини механічного напруження в струні. Вимірюючи частоту коливань струни, можна судити про деформації об'єкта. Над струною встановлений електромагніт для збудження коливань в струні при проходженні за його обмоткою електричних імпульсів. Частоту коливань струни вимірюють за допомогою сигналу, що знімається з обмотки електромагніту. Струнний тензометр є частотним приладом і тому має певні переваги з точки зору перешкодозахищеності і впливу зовнішніх електричних флуктуацій на показання тензометра. Для вимірювання зміни частоти, викликані деформаціями об'єкту, використовують частотні дискримінатори або цифрові лічильники. Похибка вимірювання струнних тензометрів 1 еод.

Велика точність струнних тензометрів і різноманіття схем обробки частотно-модульованих сигналів дозволяють використовувати ці тензометри для вимірювання як статичних, так і динамічних деформацій.

В основу роботи *електричних тензометрів* покладено принцип вимірювання зміни параметрів електричного кола, наприклад опору, індуктивності або ємності. Електричні тензометри ділять на тензометри опору, індуктивні, ємнісні, п'єзоелектричні, індукційні.

Дія *потенціометричного тензометра опору* заснована на вимірі величини опору між повзунком потенціометра, механічно пов'язаним з опорної призмою, що утворює базу, і крайнім виводом

потенціометра. Потенціометричні тензометри застосовують для вимірювання деформацій до десятих часток міліметра.

В *електролітичних тензометрах* вимірюють зміну опору між выводами двох електродів, що знаходяться в електроліті, під дією деформації. Стабільність таких тензометрів невисока.

Дія *механотронних тензометрів* заснована на використанні ефекту зміни внутрішнього опору вакуумної електронної або газонаповненої лампи при зміні під дією деформації відстані між електродами. З метою лінеаризації характеристики механотронного тензометра використовують діод з двома рухомими анодами, які легко включаються в диференціальну схему.

Зміна електричної ємності між двома пластинами, викликана переміщенням однієї з пластин під дією деформації, покладена в основу *ємнісних тензометрів*. Однак ємнісним тензометрам притаманні недоліки ємнісних датчиків, такі, як вплив пилу, вологи, температури навколишнього середовища, тому ці тензометри не отримали належного поширення.

В *індуктивних тензометрах* використовується зміна реактивного опору котушки під дією деформації. Розрізняють індуктивні тензометри з поперечним переміщенням якоря, в якому змінюється зазор магнітопроводу, тензометри з поздовжнім переміщенням якоря, при якому змінюється обсяг осереддя в порожнині котушки і тензометри зі змінною магнітною проникністю.

Існує великий клас тензометрів, дія яких заснована на принципі зміни опору металів або напівпровідників під дією деформацій. Чутливими елементами таких тензометрів є тензорезистори, які зазвичай наклеюють на пружні елементи, що перетворюють вимірювану механічну величину в деформацію пружного елемента.

### 8.3 Вимірювальні віброперетворювачі (ВПП)

Для вимірювання параметрів вібрації служать **віброметри** або **вимірювальні віброперетворювачі (ВВП)**.

#### 8.3.1 Класифікація ВВП

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*.

**За потребами у додаткових джерелах енергії** ВВП розділяються на *генераторні (пасивні)*, до яких відносяться п'єзоелектричні, електретні та ін., та *параметричні (модуляторні або активні)*, до яких 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 неспрямованої дії*. В інерційних перетворювачах спрямованої дії пружний підвіс забезпечує збереження положення й орієнтації в абсолютному просторі, тому вони можуть видавати всі шість компонентів вібрації.

### 8.3.2 Основні параметри віброперетворювачів

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

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

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

Мінімальне значення вимірюваного параметра визначається напругою шуму узгоджуючого підсилювача:

$$\left(\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} \gg 60\text{дБ}\right)$$

8.3.2.3 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:  $\Delta E$  – зміна величини сигналу на виході;

$\Delta V$  – зміна вимірюваного параметра вібрації.

Якщо між  $E$  и  $V$  існує лінійна залежність, то:

$$K_D = \frac{E}{V} = \text{const}$$

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

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

8.3.2.6 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 встановленого діапазону вимірів (нелінійність амплітудної характеристики).

8.3.2.7 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:  $\Delta E$  – зміна величини сигналу на виході;

$\Delta V$  – 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.

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

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

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

### 8.3.3 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.

### **8.3.3.1 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.

### **8.3.3.2 Зазор між вібруючим виробом і чуттєвим елементом віброперетворювача, а в ряді випадків і джерелом (випромінювачем) коливальної енергії, а також погрішність його установки**

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

Для деяких методів погрішність вимірів залежить не тільки від величини зазору, але і від співвідношення величини максимальної амплітуди переміщення ( $S_{a_{max}}$ ) і величини зазору ( $S_0$ ). В ряді випадків існують певні вимоги до величини даного співвідношення.

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

### **8.3.3.3 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.

#### **8.3.3.4 Роздільна здатність методу вимірів**

Роздільна здатність методу вимірів характеризує його здатність забезпечувати роздільне спостереження і вимір параметрів вібрації близько розташованих один до одного елементів конструкції 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.

#### **8.3.3.5 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 метода, що реалізується. 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 віброуючим 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.

### 8.3.4 Особливості застосування інерційних ВВП

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

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

$$F = m \cdot a$$

При наявності пружного зв'язку між виробом і інерційним елементом він не буде встигати за коливальними рухами

випробовуваного виробу і буде відігравати роль інерційної системи відліку.

Більшість сучасних інерційних ВВП заснована на використанні інерційних елементів, механічні коливання яких за допомогою перетворювачів перетворюються в електричні, а наявність у них пружного зв'язку з корпусом забезпечує необхідне дешифрування. З метою спрощення процесу вимірів і конструкцій ВВП, вони, в основному, виконуються односпрямованої дії і придатні для виміру одного лінійного чи кутового компонента.

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

$$m \cdot \frac{d^2(y + y_0)}{dt^2} = -k \cdot (y + \delta_{cm}) - h \cdot \frac{dy}{dt} \quad (8.1)$$

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

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

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

Тоді рівняння (8.1), вважаючи початкове переміщення  $y_0$  нульовим, можна записати у вигляді:

$$m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} + h \cdot \frac{dy}{dt} + ky = -ma \quad (8.2)$$

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;

$\Omega$  - частота, що знаходиться в межах діапазону робочих частот ( $\Omega_H \leq \Omega \leq \Omega_B$ ).

Тоді рівняння (8.2) можна представити в наступному вигляді:

$$[(j\Omega)^2 + j\Omega h + k]y_a = -(j\Omega)^2 m S_a \quad (8.3)$$

Оскільки  $\bar{S} = j\Omega \bar{S} = \frac{\bar{S}}{j\Omega}$ , то рівняння (8.3) буде мати вигляд:

$$[(j\Omega)^2 \cdot m + j\Omega h + k]y_a = -m S_a \quad (8.4)$$

Користуючись рівнянням (8.4), можна отримати формули для амплітудно-частотної (8.5) і фазової (8.6) характеристик.

$$K_\delta = \frac{m}{\sqrt{(k - \Omega^2 m)^2 + \Omega^2 h^2}} \quad (8.5)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\Omega h}{k - \Omega^2 m} \quad (8.6)$$

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 (8.5) і (8.6) можна зробити висновки про умови застосування ВВП інерційної дії.

8.3.4.1 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 ( $\lambda$ ) 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.

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

8.3.4.3 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.

8.3.4.4 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.

### 8.3.5 Конструкції та особливості роботи ВВП різного принципу дії

На рис. 8.4 наведені варіанти конструкцій різноманітних ВВП.



Рисунок 8.4 - Варіанти конструкцій ВВП

Далі розглянемо детальніше ВВП різного призначення та принципу дії.

#### 8.3.5.1 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:

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

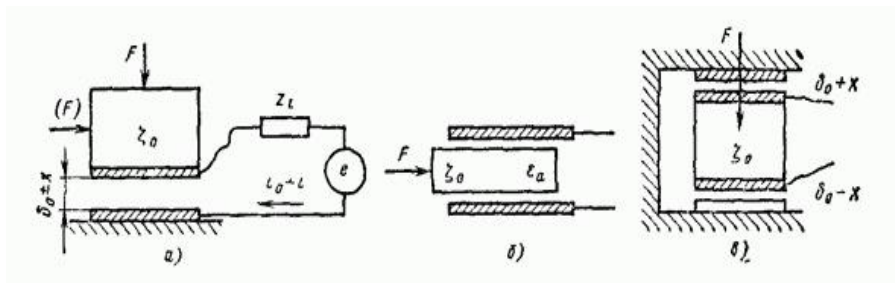
де:  $\epsilon$  - діелектрична проникність простору між електродами;

$S$  - площа електродів;

$\delta$  - зазор між електродами.

Варіанти принципових схем ємнісних ВВП наведені на рис.

8.5.



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

Рисунок 8.5 - 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.

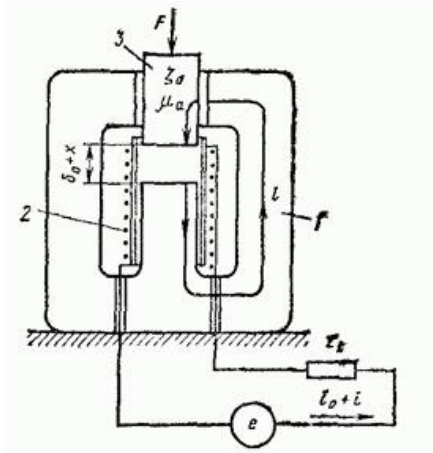
### 8.3.5.2 Індуктивні та електромагнітні ВВП

*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. 8.6).

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



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

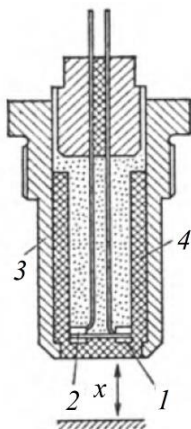
Рисунок 8.6 - Принцип дії індуктивного ВВП

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. 8.7. 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 8.7 - 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  $90^\circ$  перпендикулярно валу. Це робить можливим візуалізацію на екрані осцилографа орбіти руху валу та полярної діаграми траєкторії центру вала в радіальній площині.

### 8.3.5.3 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  $\rho$  матеріалу провідника, а саме ці величини і визначають його активний опір:

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

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

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

Цей параметр значною мірою залежить від коефіцієнта Пуассона  $\mu$ , який для більшості металів дорівнює 0,24...0,50:

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

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. 8.8 наведена конструкція найпростішого **дротового тензодатчика**.

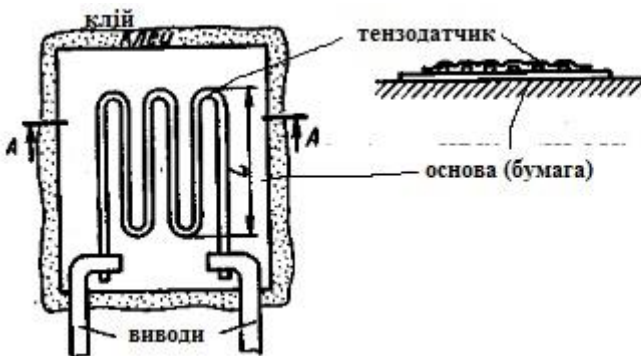


Рисунок 8.8 - Конструкція дротового тензодатчика

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 сульфїду 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/мм<sup>2</sup>).

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. 8.9 показані різні типи фольгових тензодатчиків.



а)

б)

в)

Рисунок 8.9 - Конструкції фольгових тензодатчиків

Конструкція, наведена на рис. 8.9 а призначена для вимірювання лінійних переміщень; 8.9 б - розетка з двох датчиків, що дозволяє вимірювати деформації в двох взаємно перпендикулярних напрямках; 8.9 в - датчик, призначений для наклеювання на мембрану і вимірювання тиску.

**У напівпровідникових тензодатчиках** використовуються кристалічні напівпровідникові матеріали.

Принцип дії такий же, як і у дрових 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.

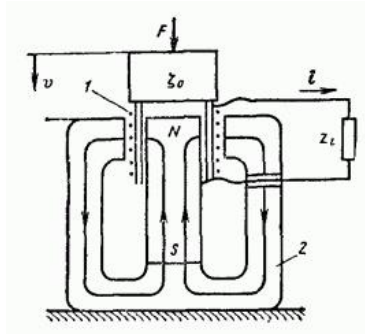
Найбільшого поширення набули германієві і кремнієві тензодатчики, причому останні здатні працювати при високих температурах (до 540°C) і великих механічних навантаженнях.

### 8.3.5.4 Електродинамічні ВВП

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

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

Принцип дії електродинамічного ВВП можна пояснити за допомогою рис. 8.10.



1 - котушка; 2 - магнітна система

Рисунок 8.10 - 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  $\mu = VI$ .

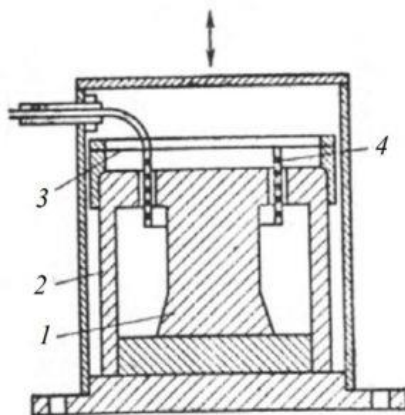
Існує багато різновидів перетворювачів такого типу, наприклад, з плоскою котушкою у однорідному магнітному полі, з рухомим магнітом, з перетворюванням лінійної швидкості в кутову і т.ін.

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

На рис. 8.11 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 8.11 - Конструкція електродинамічного велосиметра

### 8.3.5.5 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.

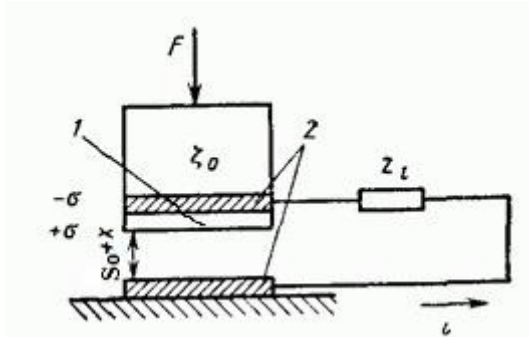
Електретом називається діелектрик, який здатен поляризуватися і потім тривалий час зберігати поляризований стан після зняття зовнішнього впливу, яке призвело до поляризації (або зарядження) цього діелектрика, створюючи в навколишньому просторі квазістале електричне поле. Таким чином, електрет є електричним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

Електретний ефект виникає при відповідній обробці діелектрика (нагрів та охолодження у електричному полі, гамма- 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  $\sigma$  зменшується досить швидко, а потім процес стабілізується. Стабільність  $\sigma$  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. 8.12.

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 8.12 - 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;

$\epsilon$  - абсолютна проникність матеріалу електрета;

$S$  - зазор між електретом та електродом.

При цьому поверхнева густина заряду визначається за формулою:

$$\sigma_{\text{инд}} = \frac{\sigma}{\frac{S\epsilon}{d} + 1} \quad (8.7)$$

де  $\sigma$  - поверхнева густина заряду електрета.

Під впливом періодичної вібрації зазор змінюється за законом:

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

де  $S_0$  - початковий зазор між поверхнями електрета і виробів;

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

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

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

$$i = \frac{dq}{dt} = P \frac{d\sigma_{ind}}{ve} = \frac{P\varepsilon\omega}{d\left(\frac{S\varepsilon}{d} + 1\right)^2} \frac{dS(t)}{dt} \quad (8.8)$$

З виразу (8.8) витікає, що безконтактний електретний ВВП є джерелом струму, який пропорційний швидкості вібрації  $\left(\frac{dS(t)}{dt}\right)$ .

Опір навантаження:

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

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

$$U_{вых} = iZ_H = \frac{P\varepsilon\sigma R_H \Omega S_a \cos \Omega t}{d\left(\frac{S\varepsilon}{d} + 1\right)^2 \cdot (1 + \Omega^2 C_\varepsilon^2 R_H^2)} \quad (8.9)$$

При цьому:

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

де  $C_0$  – ємність електретного ВВП;

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

$C_\kappa$  – ємність кабелю.

Аналіз виразу (8.9) дозволяє зробити висновок, що для зменшення залежності  $U_{вых}$  від частоти необхідне виконання умови:

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

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

Розміщаючи вхідний пристрій вимірювального приладу (віброметра) в одному корпусі з перетворювачами та виконуючи його за схемою джерельного повторювача на польовому транзисторі, можна зменшити  $C_\kappa$  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.

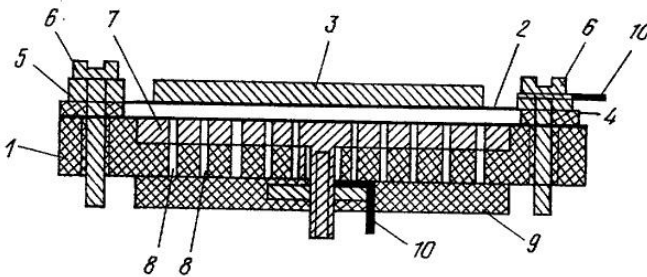
У технічних цілях найчастіше застосовуються електрети, отримані з тонких неполярних фторполімерних плівок товщиною 10...25 мкм, які можуть бути з одного боку покриті тонким шаром металу, найчастіше алюмінію. Металевий шар наносять методом вакуумного розпилення. Він служить одним з електродів пристрою, 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  $\sigma$ . Після термообробки у електричному полі напруженістю  $10^9$  В/м вона становить близько  $2 \cdot 10^{-12}$  Кл/м<sup>2</sup>, та протягом місяця зменшується до  $8 \cdot 10^{-13}$  Кл/м<sup>2</sup>, 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  $\text{CaTiO}_3$ .

Варіант конструкції одного з найстаріших електретних ВВП наведений на рис. 8.13. 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 8.13 - Конструкція електретного ВВП SU 1171668

### 8.3.5.6 П'єзоелектричні ВВП - принцип дії та особливості роботи

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

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

**При прямому п'єзоєфекті** 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'єзоєфекті** 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  $\mathbf{E}$ , поляризація  $\mathbf{P}$  (чи електрична індукція  $\mathbf{D}$ ), пружне напруження  $\boldsymbol{\sigma}$  і деформація  $\boldsymbol{\xi}$ .

**Пружне напруження ( $\boldsymbol{\sigma}$ )** визначається як сила, що діє на одиницю площі.

**Деформація ( $\boldsymbol{\xi}$ )** 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  $\mathbf{E}$ , визначається за формулою:

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

де  $\aleph$  - коефіцієнт поляризації.

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

**Електрична індукція  $\mathbf{D}$ :**

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

де  $E_0$  – електрична стала;

$E$  – діелектрична проникність діелектрика.

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

$$D = d \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (8.10)$$

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

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

$$\boldsymbol{\xi} = d \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_n \quad (8.11)$$

де  $\boldsymbol{\xi}$  - деформація;

$\boldsymbol{\varepsilon}_n$  – напруженість електричного поля.

Значення п'єзомодуля різне для різних кристалічних речовин. З формул (8.10) і (8.11) витікає, що:

$$\left( \frac{D}{\boldsymbol{\sigma}} \right)_{\boldsymbol{\varepsilon}=0} = d \quad \text{і} \quad \left( \frac{\boldsymbol{\xi}}{\boldsymbol{\varepsilon}} \right)_{\boldsymbol{\sigma}=0} = d \quad (8.12)$$

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

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

$$\begin{pmatrix} D \\ \sigma \end{pmatrix}_{\varepsilon=0} = \begin{pmatrix} \xi \\ \varepsilon \end{pmatrix}_{\sigma=0} \quad (8.13)$$

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

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

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

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

$$U_{\text{эк}}(t) = -\frac{m}{\mu_n^2 c_0} \frac{d}{dt} V(t) \quad (8.14)$$

де  $m$  – маса інерційного елемента;

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

$\mu_n$  – коефіцієнт електромеханічного перетворення п'єзоелемента, який визначається за формулою:

$$\mu_n = \alpha f = \alpha \frac{(\Sigma)_{D=0}}{(E)_{D=0}} \quad d = \alpha \frac{(\Sigma)_{\varepsilon=0}}{(E)_{\varepsilon=0}} \quad (8.15)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, що залежить від форми і розмірів п'єзоелемента;

$f$  – п'єзоелектрична стала;

$\Sigma$  – модуль пружності;

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

З формули (8.14) видно, що напруга на виході п'єзоелектричного перетворювача пропорційна прискоренню.

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

$$K_d = \frac{U}{a_d} = \frac{\mu_n}{\omega_0^2} \cdot \frac{C_0}{\sqrt{(C_0 + C_{ex})^2 + \frac{1}{\Omega^2 r_{ex}^2}}} \cdot \frac{m}{\sqrt{(k - \Omega^2 m) + \Omega^2 h^2}} \quad (8.16)$$

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

$\Omega$  - частота коливань;

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

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

$h$  – коефіцієнт демпфірування.

В області нижчих частот можна зневажити сумою  $C_0 + C_{вх}$  у порівнянні з  $\frac{1}{\Omega \cdot r_{ex}}$  і тоді формула (8.16) приймає спрощений вигляд:

$$K_d = \mu_N \frac{r_{ex} \cdot C_0}{\omega_0} \cdot \frac{m}{\sqrt{(K - \Omega^2 m) + \Omega^2 h^2}} \left[ \frac{Bc^2}{M} \right] \quad (8.17)$$

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:

$$C_{екз} = \frac{\mu_n C_0^2}{K}$$

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  $\omega_0$  коливальної системи перетворювача значно вище частоти  $\Omega_B$  у 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 (8.19) за умови, що впливом демпфірування можна знехтувати, тобто  $h \rightarrow 0$ , і виконується умова (8.18):

$$\frac{1}{\omega_H \cdot (C_0 + C_{вх})} \ll R_{вх} \quad (8.18)$$

$$K_D = \frac{\mu_n}{\omega_0^2} \frac{C_0}{C_0 + C_{\text{вх}}} \left[ \frac{Bc^2}{M} \right] \quad (8.19)$$

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:

$$\mu_n = \frac{E}{\varepsilon} d \quad (8.20)$$

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

де  $S_n$ ,  $b$  і  $\Delta$  – площа основи, висота і густина матеріалу інерційного елемента відповідно.

Звідси власна частота визначається за формулою:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{\frac{SE}{S_n lb\Delta}} \quad (8.21)$$

Бажано, щоб п'єзоелектричний ВВП мав великий коефіцієнт перетворення і високу власну частоту перетворення ( $\omega_0$ ) і ємність ( $C_0$ ). Однак формули (8.20) і (8.21) 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 ( $\Delta$ ), підвищує коефіцієнт перетворення, але знижує власну частоту ( $\omega_0$ ).

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

### 8.3.5.7 П'єзоелектричні ВВП - особливості конструкції

Конструкцію п'єзоелектричного ВВП, заснованого на прямому п'єзоєфекті, 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.

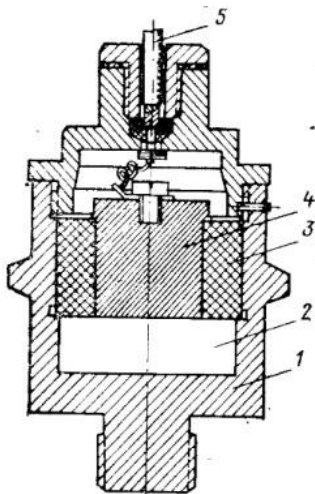
Особливістю **четвертої групи** є те, що п'єзоелемент виконано у формі циліндра і напруга на обкладинках з'являється внаслідок зсуву при сприйнятті перетворювачем механічних коливань за напрямком осі поляризації, що збігається з віссю центрального затиску.

#### **Переваги конструкції:**

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

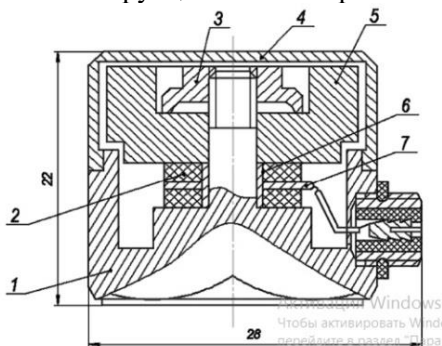
Сигнал з перетворювача знімається з торцевих поверхонь, перпендикулярних до вісі поляризації.

На рис. 8.14 - 8.18 наведені варіанти конструкцій та зовнішній вид деяких п'єзоелектричних ВВП інерційної дії, заснованих на прямому п'єзоєфекті.



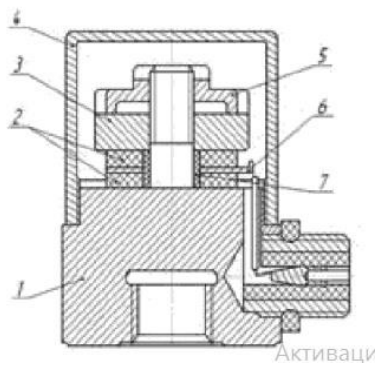
1 - корпус, 2 - п'єзоелемент, 3 - ізолятор, 4 - інерційна маса (тягар), 5 - вивід

Рисунок 8.14 - 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 8.15 - Конструкція п'єзоелектричного ВВП типу ДН-3



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

Рисунок 8.16 - Конструкція п'єзоелектричного ВВП типу ДН-4



Рисунок 8.17 - П'єзоелектричний ВВП ЛВП-А



Рисунок 8.18 - П'єзоелектричний ВВП ЛВП-Б

Для виготовлення п'єзоелектричних перетворювачів найчастіше застосовується п'єзокераміка ЦТС – цирконат титанат свинцю, що має високу чуттєвість (300 нК/Н), рівномірну температурну характеристику і забезпечує можливість виміру при температурах до 260<sup>0</sup>С.

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.

### 8.3.5.8 Інші види ВВП

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

Конструкція **оптичного ВВП** у розрізі наведена на рис. 8.19.

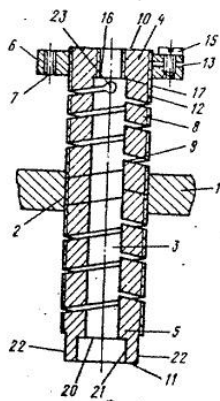


Рисунок 8.19 - Конструкція оптичного ВВП SU 1415070

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 площин 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 (гамма-квантових) ВВП** заснований на використанні ефекту Месбауера, який полягає у резонансному поглинанні гамма-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 гамма-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. 8.20.



Рисунок 8.20 - Мікроелектромеханічний ВВП DVA 132

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

Індуктивні ВВП - 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 ВВП. Їх переваги - можливість одночасно виконувати функції механічного перетворювача.

Конструкції та характеристики деяких видів ВВП наведені у [21], [24] - [27].

## 8.4 Обладнання для випробувань на вібраційні впливи

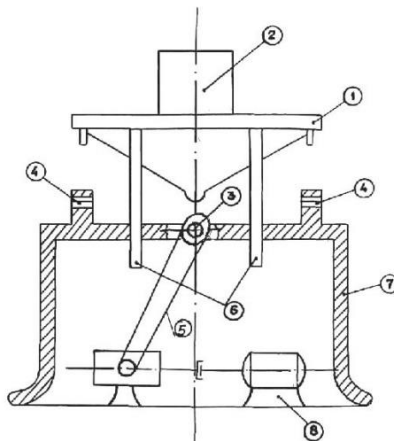
Для створення вібраційних навантажень використовуються механічні (ексцентрикові та відцентрові) і електродинамічні вібростенди.

**Ексцентрикові стенди** дозволяють отримувати максимальну амплітуду коливань 0,4...4,0 мм або максимальне прискорення до 25 g в діапазоні частот від 20 до 80 Гц.

Схема вібростенда наведена на рис. 8.21.

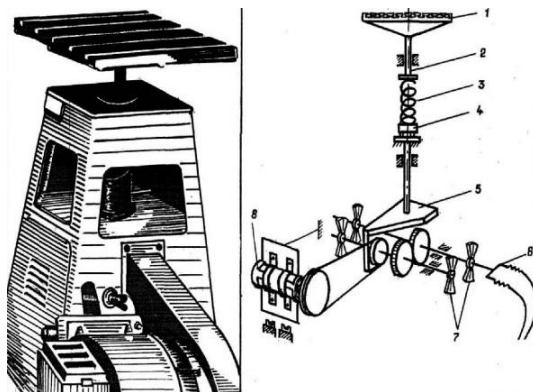
Вібрація робочого столу **відцентрового стенду** виникає під дією результуючої відцентрової сили, що утворюється при обертанні в протилежних напрямках двох валів з дисбалансами. Амплітуда коливань залежить від статичного моменту маси дисбалансів щодо їх осі обертання і частоти обертання дисбалансів, а частота вібрації - тільки від частоти обертання дисбалансів.

Зовнішній вигляд та схема вібростенда з відцентровим приводом наведені на рис. 8.22.



1 - стіл вібростенда; 2 - виріб; 3 - ексцентрик; 4 - обмежувач; 5 - клиноремінна передача; 6 - спрямовуючі; 7 - станина; 8 - електродвигун

Рисунок 8.21 - Схема вібростенда ексцентрикового типу



1 - платформа станда; 2 - шток; 3 - пружний елемент; 4 - регулятор; 5 - спрямовуючі; 6 - фіксатор; 7 - дисбаланси; 8 - електродвигун

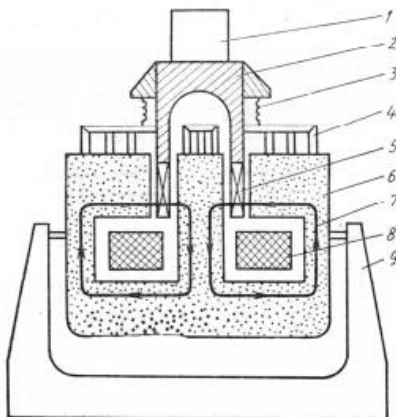
Рисунок 8.22 - Зовнішній вигляд та схема вібростанда з відцентровим приводом

Вібраційні стени з відцентровим приводом забезпечують коливання з амплітудою до 5 мм і максимальним прискоренням до 25g в діапазоні частот від 20 до 200 Гц.

Принцип дії **електродинамічного вібростанда** заснований на взаємодії струму, що протікає по обмотці рухомої котушки з постійним магнітним полем електромагніту.

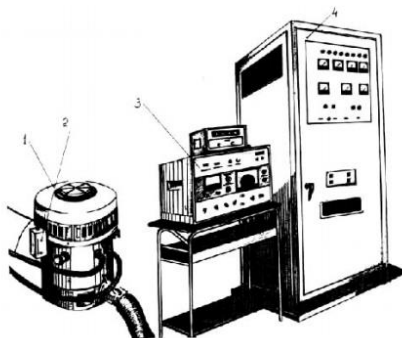
На рис. 8.23 наведена конструкція електродинамічного вібростанда, а на рис. 8.24 - зовнішній вигляд електродинамічної вібраційної установки.

Сучасні електродинамічні вібростени забезпечують створення синусоїдальної вібрації в діапазоні частот від 5 Гц до 10 кГц з прискоренням до 50-100 g або максимальною амплітудою зміщення до 10 мм.



1 - виріб, що випробується; 2 - стіл вібростенда; 3 - пружна підвіска стола; 4 - магнітний екран; 5 - рухома котушка; 6 - магнітопровід; 7 - шлях магнітного потоку; 8 - котушка підмагнічування; 9 - основа

Рисунок 8.23 - Конструкція електродинамічного вібростенда



1 - електродинамічний вібростенд; 2 - узгоджуючий підсилювач; 3 - система управління вібраційною установкою (СУВУ); 4 - підсилювач

Рисунок 8.24 - Зовнішній вигляд електродинамічної вібраційної установки

## 8.5 Обладнання для випробувань на ударні впливи

При випробуваннях РЕЗ на багаторазові ударні навантаження використовуються механічні та електродинамічні стенди і установки.

У **механічних ударних стендах** ударне прискорення створюється в вертикальному напрямку при ударі вільно падаючого столу 5 з прикріпленням до нього випробовуваним виробом о пружні елементи 3, встановлені на станині 2 (див. рис. 8.25).

Величина прискорення залежить від висоти падіння і маси столу. Тривалість і форма ударного імпульсу залежать від того, як з моменту зіткнення робочого столу з пружними елементами ударне прискорення наростає до максимального значення і регулюється підбором товщини і жорсткості каліброваних пружних елементів.

Частота ударів встановлюється шляхом зміни числа обертів електродвигуна, що обертає кулачок 7, який піднімає стіл стенда.

**Електродинамічна ударна установка** (рис. 8.26) складається зі стійки управління і безпосередньо ударного стенда.

Принцип її дії заснований на тому, що при протіканні змінного струму по обмотці рухомої котушки, що знаходиться в постійному магнітному полі, виникає сила, яка змушує рухому котушку і пов'язаний з нею стіл здійснювати коливання з частотою струму, що протікає через котушку. Удар виходить при розряді через рухому котушку конденсаторної батареї, що входить до складу шафи управління.

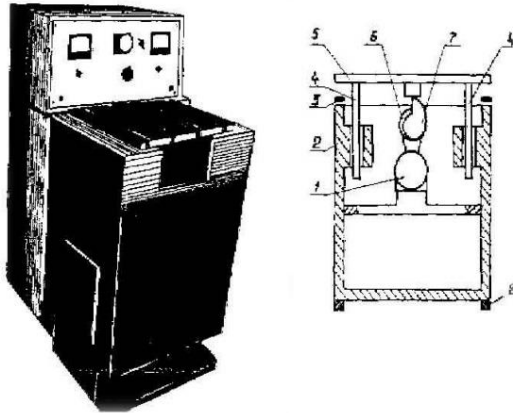
Сила, що виникає при цьому, визначається за формулою:

$$F = 2 \cdot B \cdot L \cdot I \cdot 10^{-6}$$

де  $B$  - індукція в повітряному зазорі магнітного ланцюга вібратора;

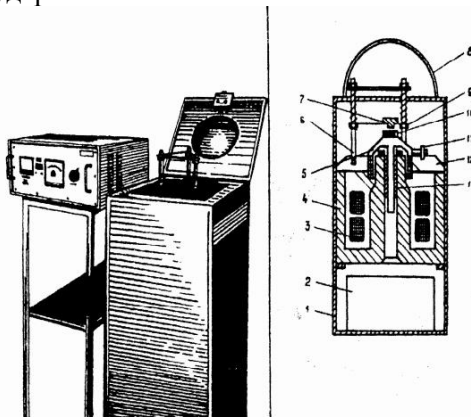
$L$  - довжина провідника рухомої котушки;

$I$  - ефективне значення сили струму в рухомій котушці.



1 - електродвигун; 2 - станина; 3 - пружні елемента (амортизуючі прокладки); 4 - спрямовуючі; 5 - стіл; 6 - клиноремінна передача; 7 - кулачок; 8 - гумові амортизатори

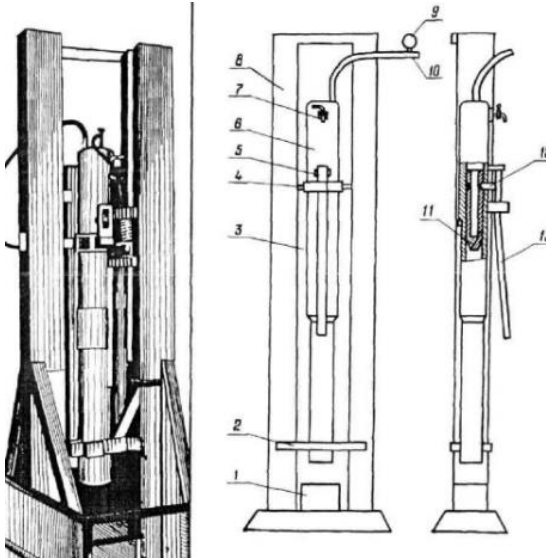
Рисунок 8.25 - Схема стенда для випробувань на вплив багаторазових ударів



1 - кожух; 2 - блок живлення; 3 - обмотка підмагнічування; 4 - корпус електромагніту; 5 - рухома система; 6, 11 - спрямовуючі; 7 - стіл; 8 - кришка стенду; 9 - мембрана; 10 - прокладка; 12 - кришка електромагніту; 13 - втулка

Рисунок 8.26 - Електродинамічна ударна установка

При випробуваннях на вплив одиночних ударів з великим прискоренням використовуються **пневматичні ударні установки** (див. рис. 8.27), а також ударні стенди копрового типу.



1 - ковадло; 2 - затиск; 3 - спрямовуючий стіл; 4 - вісь; 5 - запірно-спусковий механізм; 6 - робоча камера; 7 - кран; 8 - станина; 9 - манометр; 10 - шланг; 11 - болванка; 12 - замковий зуб; 13 - важіль

Рисунок 8.27 - Пневматична ударна установка

У деяких випадках РЕЗ може проходити випробування на ударну міцність при вільному падінні шляхом її скидання з певної висоти на вкриту повстю або іншим матеріалом сталеву плиту, вмонтовану в бетонну основу.

## 8.6 Обладнання для випробувань на лінійні прискорення

Вплив лінійних прискорень на різні вироби в процесі проведення лабораторних та стендових випробувань забезпечується за

допомогою спеціальних центрифуг, що створюють в горизонтальній площині радіально спрямовані прискорення. Основна задача випробувань з використанням центрифуг - встановлення залежності параметрів об'єкту випробувань від значних порівняно з прискоренням сили тяжіння вхідних прискорень.

Залежно від режиму випробувань, а також габаритних розмірів і маси випробовуваних виробів застосовують різні центрифуги, що входять в конструкцію відповідних установок. Слід мати на увазі, що структурні схеми установок можуть відрізнятися в залежності від вибору приводу, побудови системи автоматичного регулювання, перетворювача, що використовується, тощо.

### 8.6.1 Принцип дії та структурна схема установок лінійного прискорення

Принцип дії простішої центрифуги проілюстрований на рис. 8.28.

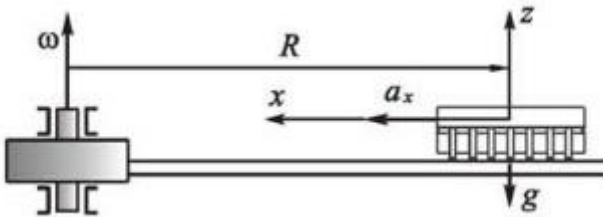


Рисунок 8.28 - Принцип дії простішої центрифуги

Згідно з цією схемою для проєкцій прискорень на вісі Охуз, пов'язані з об'єктом випробувань, мають місце співвідношення:

$$a_x = \omega^2 \cdot R; a_y = 0; a_z = -g$$

де:  $\omega$  - кутова швидкість обертання центрифуги;  
 $R$  - радіус обертання

Структурна схема, наведена на рис. 8.29, відображає загальний принцип побудови установок лінійного прискорення.

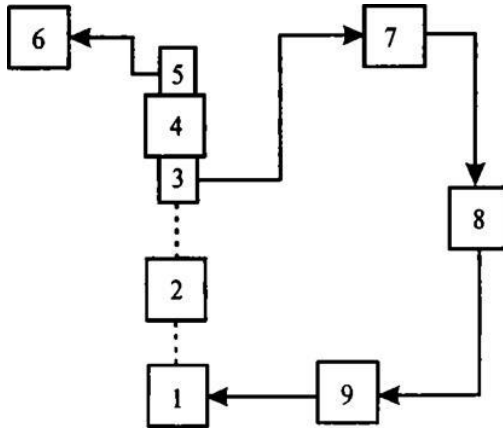


Рисунок 8.29 - Структурна схема установок лінійного прискорення

Основним вузлом центрифуги є привід 1, який спільно з редуктором 2 визначає ряд значень параметрів установки. Отриманий обертальний рух передається столу (платформі) 4 центрифуги, на якому кріпиться випробуваний виріб.

Для проведення випробування на стійкість виробу, який знаходиться під електричним навантаженням, використовується струмознімальний пристрій 5. Лінійні прискорення контролюються за допомогою засобу вимірювань 6, що складається з перетворювача 3 і вимірювального приладу 7. Сигнали з вимірювального приладу можуть підводитися по ланцюгу зворотного зв'язку до системи автоматичного управління 8, що підтримує сталість заданих режимів випробувань шляхом впливу керуючих сигналів на джерело живлення 9.

### 8.6.2 Класифікація центрифуг та їх основні параметри

Класифікацію центрифуг можна проводити за такими ознаками:

- за призначенням - для випробувань на лінійні перевантаження і на комбінований вплив факторів навколишнього середовища;

- за типом приводу - з електричним приводом і з гідравлічним приводом;
- за значення максимального лінійного прискорення: А - до  $200 \text{ м/с}^2$ , Б - до  $500 \text{ м/с}^2$ , В - до  $1000 \text{ м/с}^2$ , Г -  $2000 \text{ м/с}^2$ , Д - понад  $2000 \text{ м/с}^2$ ;
- за конструкцією - відкритого і камерного типу, з неповоротним і поворотним столом;
- за вантажопідйомністю малі - до 10 кг, середні - до 50 кг, важкі - до 100 кг і надважкі - понад 100 кг.

Центрифуги характеризуються наступними основними параметрами.

8.6.2.1 **Максимальне значення лінійного прискорення.**

8.6.2.2 **Діапазон лінійних прискорень** на заданому радіусі обертання.

8.6.2.3 **Відхилення лінійного прискорення** від заданого значення. При лінійних розмірах виробу менше 10 мм воно не повинно перевищувати 10%. В інших випадках прискорення повинно знаходитися в межах від -10 до + 30% від заданого значення. Слід мати на увазі, що для виробів великих габаритних розмірів відтворюваність випробувань має нижчий порядок і залежить від відносних розмірів виробу і центрифуги.

8.6.2.4 **Допустима величина тангенціального прискорення.**

В процесі розгону центрифуги поряд з доцентровим прискоренням  $a_n$  виникає і тангенціальне (дотичне) прискорення  $a_t$ , яке відсутнє у більшості випадків при реальній експлуатації. Сили інерції від тангенціальних прискорень можуть спотворити картину випробувань, впливаючи на функціонування випробовуваних виробів. Тому встановлено, що  $a_t$  не повинно перевищувати 10% від заданого прискорення, тобто  $a_t < 0,1 a_n$ .

8.6.2.5 **Тривалість впливу лінійних прискорень** в процесі випробувань. При випробуваннях найбільш критичною є дія під час наростання прискорення  $\tau_n$ , тому сама тривалість  $\tau$  впливу з заданим лінійним прискоренням може бути невеликою. Залежно від умов експлуатації доцільно передбачати форму (закон) зміни лінійного прискорення в часі. Найбільш поширені трапецеїдальна і дзвоноподібна форми.

8.6.2.6 *Тривалість розгону* (наростання)  $\tau_n$  *і гальмування* (спаду)  $\tau_c$  фронту навантаження.

Крім зазначених вище параметрів центрифуги в ряді випадків необхідно визначати додаткові її параметри, значення яких залежать від конструктивного виконання і якості реалізації центрифуги. До таких параметрів належать: допустима нерівномірність прискорення по столу (платформі) центрифуги; допустиме відхилення поверхні столу центрифуги від горизонтальної площини; допустима вібрація столу; припустима зміна довжини плеча столу при зміні швидкості обертання; допустима неврівноваженість в горизонтальній і вертикальній площинах щодо центру обертання столу; час безперервної роботи з заданим постійним прискоренням; максимальна вантажопідйомність, розміри столу.

Крім перерахованих параметрів зазвичай наводиться ще ряд інших, що характеризують умови експлуатації, установочні розміри тощо.

### 8.6.3 Конструкції центрифуг

Розглянемо основні конструкції застосовуваних центрифуг.

Найпростіша установка для відтворення лінійних прискорень має центрифугу відкритого типу з неповоротним столом (див. рис. 8.30).

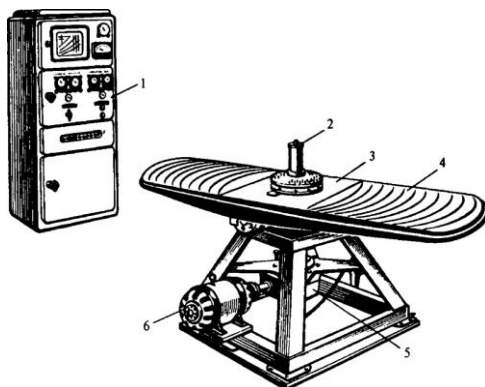


Рисунок 8.30 - Центрифуга відкритого типу з неповоротним столом

У комплект установки крім самої центрифуги входить також стійка 1 з блоками, які містять контрольно-вимірювальну апаратуру.

Стіл (платформа) 3 центрифуги приводиться в обертання електродвигуном 6 через редуктор 5. Стіл має різьбові отвори 4, які забезпечують кріплення виробів або пристосувань.

Стіл повинен мати високу механічну міцність і твердість, що виключає його вібрацію. Для зменшення аеродинамічного опору площина столу повинна бути горизонтальною.

Для забезпечення випробувань виробів в робочому стані під електричним навантаженням передбачено струмознімальний пристрій, в конструкцію якого входить колектор 2 зі струмопідволами, що закінчуються штепсельними колодками.

Для випробувань виробів електронної техніки найбільше застосування отримали установки з центрифугами камерного типу, які характеризуються тим, що в них стіл (ротор) розміщується в робочій камері центрифуги.

Конструктивно установки з центрифугами камерного типу (рис. 8.31) можуть бути виконані спільно і роздільно зі стійкою управління приводом.

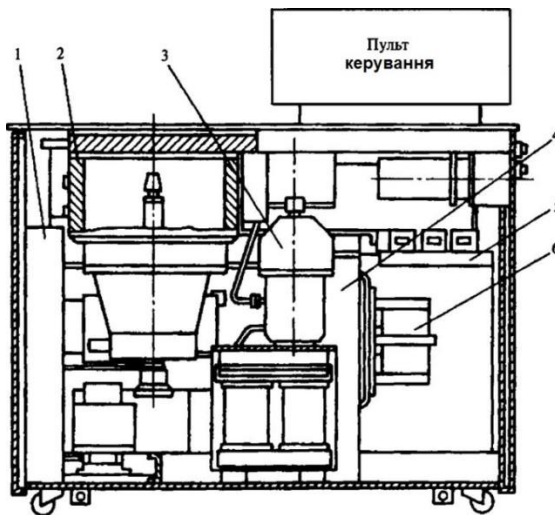


Рисунок 8.31 - Центрифуга камерного типу

Особливістю зазначених центрифуг є необхідність відтворення великих значень прискорень, а отже, великої кількості оборотів. У зв'язку з цим для зменшення тертя ротора об повітря в робочій камері створюється вакуум, а також передбачається охолоджуючий агрегат 3.

При виконанні центрифуги з приводом і системи управління в єдиному корпусі зміна лінійного прискорення досягається регулюванням числа обертів ротора центрифуги 2 шляхом зміни частоти напруги живлення за допомогою перетворювача частоти, що складається з керованого випрямляча 1 і автономного інвертора 4.

Установки лінійного прискорення, що містять центрифуги з поворотними столами, в основному застосовуються для імітації швидкого наростання імпульсу і синусоїдального сплеску перевантаження. Зазначені центрифуги дозволяють відтворити перевантаження без урахування дії сил інерції, обумовлених дотичним прискоренням, що досягається за допомогою спеціальних інерційних тіл.

Можливе створення програмних центрифуг, в яких обертання валу змінюється за заданим законом і відтворює вхідний (керуючий) вплив. Одним з основних вузлів такої центрифуги є привід з електродвигуном постійного струму, який має широкий діапазон регулювання кутової швидкості і відносно високий ККД, що забезпечують плавне регулювання кутової швидкості в певних межах з заданою точністю.

Система автоматичного керування центрифугою включає запрограмований пристрій, проміжний і кінцевий підсилювачі, елементи зворотного зв'язку й приводний (виконавчий) двигун. Така система дозволяє змінювати частоту обертання столу центрифуги відповідно до заданого закону.

Для випробувань виробів в робочому стані під електричним навантаженням центрифуга повинна мати струмознімальний пристрій (струмознімач), що забезпечує підведення до випробуваного виробу напруги живлення і вхідних електричних сигналів, а до засобів вимірювання - вхідних електричних сигналів. У використовуваних струмознімальних пристроях контакт рухомого елемента взаємодіє з нерухомим. Найчастіше застосовуються колекторні і ртутні струмознімачі.

Конструкції та основні параметри сучасних випробувальних центрифуг можна також глянути у [21], [22], [23], [28], [29].

## 9 ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА КЛІМАТИЧНІ ВПЛИВИ

### 9.1 Впливи кліматичних факторів на РЕЗ

В процесі експлуатації і зберігання РЕЗ піддається впливу довколишнього середовища.

#### 9.1.1 Температурні впливи

Одними з основних кліматичних факторів, що обумовлюють нестабільність і деградацію параметрів РЕЗ, є **температурні впливи**.

Для забезпечення нормальної роботи РЕЗ і її елементів важливе значення мають їхні теплові характеристики. Підвищення температури РЕЗ може відбуватися під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів. При цьому розрізняють безупинний, періодичний і аперіодичний вплив.

Вплив зовнішніх факторів визначається кліматичними умовами, розташуванням РЕЗ на об'єкті і відстанню до зовнішніх джерел тепла.

Температура повітря може коливатися в широких межах (від  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $+68^{\circ}\text{C}$ ), причому верхня межа збільшується за рахунок нагрівання при впливі сонячної радіації.

Температура і швидкість нагрівання РЕЗ залежать від матеріалу і кольору покриття, теплоємності матеріалу РЕЗ, його маси і т.ін. Зазначені фактори визначають граничну температуру нагрівання, по досягненні якої поверхня виробів починає випромінювати тепло.

Вплив внутрішніх факторів в основному залежить від схемного і конструктивного рішень.

Безупинному тепловому впливу піддаються РЕЗ, що функціонують у стаціонарних умовах. Тривалість установаження стаціонарного режиму РЕЗ визначається її призначенням і прийнятими схемно-конструкторськими рішеннями і може коливатися в межах від 0,5 до 2,5...3 год.

Періодичному тепловому впливу піддаються рухомі РЕЗ (носимі, а також ті, що експлуатуються у кузовах автомобілів, на річкових судах, на залізничному транспорті, літаках тощо). При експлуатації авіаційних засобів перепади температури можуть досягати  $80^{\circ}\text{C}$  при швидкості зміни температури до  $50^{\circ}\text{C}$  в хв.

Аперіодичному тепловому впливу піддаються РЕЗ, що установлені на космічній техніці (на ракетах у момент запуску і входження в щільні шари атмосфери).

Вплив підвищеної температури приводить, як правило, до змін фізико-хімічних, електричних і механічних властивостей матеріалів ЕРЕ, що в остаточному підсумку приводить до зміни вхідних і вихідних параметрів системи.

Істотний вплив температури на стабільність параметрів РЕЗ обумовлений температурною залежністю електрофізичних параметрів матеріалів. Певну небезпеку для РЕЗ представляють різкі коливання температури навколишнього середовища внаслідок наявності в конструкції пов'язаних матеріалів з різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення (ТКЛР).

### 9.1.2 Вплив вологи

До складу повітря входять водяні пари, які і створюють його вологість. Кількість водяної пари у обсязі повітря в залежності від кліматичних умов змінюється в широких межах: від 4% в тропіках до 1% в середніх широтах і 0,01% в холодних зонах в зимовий час. Хоча частка водяної пари в загальній масі повітря і невелика, проте і така відносно невелика кількість водяної пари в загальній суміші повітря як газу надає вологому повітрю особливі властивості.

Для характеристики кількості водяної пари у вологому повітрі використовують такі параметри: абсолютна вологість  $a$ , вологість насичення  $A$ , відносна вологість  $\phi$ , парціальний тиск водяної пари  $P_{п}$  і максимальний парціальний тиск  $P_{п,м}$  (тиск насичення) водяної пари.

Багато властивостей РЕЗ залежать від вологості її складових елементів. При цьому волога в кожному елементі в загальному випадку може бути присутньою в газоподібному, рідкому або твердому стані і перебувати як на поверхні елемента, так і в його об'ємі.

Найбільше погіршення властивостей елементів викликає рідка фаза - вода. Тому характер **впливу вологи** на РЕЗ та її елементи визначається властивостями води в рідкому, твердому і газоподібному станах, наявністю розчинених домішок і їх властивостями.

Можливі дві основні форми взаємодії води з матеріалами.

За першою волога проникає в тріщини, зазори, капіляри або знаходиться на поверхні, утримуючись на його дрібнодисперсних

частинках. Це погіршує фізико-хімічні, електричні та теплові властивості, прискорює процеси старіння.

При другій формі вода виявляється хімічно пов'язаною з елементами речовини, що призводить до прискорення процесів корозії металів, до гідролізу і сприяє розпаду деяких матеріалів, що нерідко призводить до виходу з ладу різних ЕРЕ.

При ненадійному захисті від вологи в різних типах конденсаторів з твердим діелектриком різко знижується опір ізоляції, зростають ємність і втрати, зменшується допустима величина робочої напруги. У керамічних і герметизованих конденсаторах волога, хоча і не проникає всередину, але, конденсуючись на поверхні, зменшує поверхневий опір ізоляції. Наявність парів води в повітрі викликає зміну його діелектричної проникності, що в свою чергу призводить до зміни ємності конденсаторів з повітряним діелектриком і порушення стабільності РЕЗ. Проте, конденсатори з повітряним діелектриком і великими зазорами найбільш стійкі проти дії вологої атмосфери. На ємність конденсаторів з повітряним діелектриком впливає також корозія його металевих обкладинок.

Волога інтенсивно впливає на опір резисторів різних типів і конструкцій.

Періодична дія вологи на тонкошарові плівкові резистори призводить до набухання лакового покриття і часткового відриву провідного шару від основи, наслідком чого є зменшення опору і поверхневий пробій, зменшення надійності контактів.

У дротяних резисторах наявність вологи призводить до корозії і інтенсивного окислювання провідників і особливо поверхонь рухомих контактів, що сприяє зменшенню фактичного перетину провідників, зростанню їх опору і зниженню надійності контактів.

При впливі вологи на високочастотні котушки і дроселі збільшуються власні ємності, втрати і відповідно знижується добротність. Більш чутливі до дії вологи котушки з каркасами з гігроскопічних матеріалів, намотані проводами в шовкової і бавовняної ізоляції. Дія вологи знижує добротність таких котушок до 40%.

У трансформаторах і дроселях низької частоти відбувається не тільки зростання втрат, а й збільшується місцевий тепловий перегрів, що погіршує коефіцієнт корисної дії трансформатора і змінює індуктивність дроселя. Волога, проникаючи через тріщини в заливці, зменшує опір міжвиткової і міжшарової ізоляції, сприяє розвитку

електрохімічних процесів між витками, що збільшує ймовірність коротких замикань.

Поглинання енергії електромагнітних коливань вологим середовищем викликає додаткові втрати в індуктивних і ємнісних елементах, тобто веде до зниження ККД і добротності контурів.

Під дією вологи параметри напівпровідникових структур змінюються, що призводить до дрейфу електричних параметрів інтегральних мікросхем, зменшення коефіцієнта посилення транзисторів, зміни пробивних напружень напівпровідникових переходів.

Проникнення води і пари в матеріали органічного походження викликає зміну розмірів, розбухання, зниження опору вигину та підвищення опору удару через збільшення в'язкості матеріалу.

Для більшості елементів РЕЗ оптимальними з надійності значеннями відносної вологості можна вважати 30...60%.

При вологості більше 60% істотно збільшуються струми витоків ізоляційних матеріалів, а при вологості менше 30% відбувається інтенсивне осушення органічних ізоляційних матеріалів за об'ємом; з них виділяється не тільки волога, що знаходиться в капілярах, але і структурно зв'язана волога, що призводить до втрати еластичності, зменшення механічної міцності цих матеріалів, а при тривалому (понад 3 міс.) перебуванні в такому середовищі органічні ізоляційні матеріали стають крихкими, втрачають еластичність, на них з'являються поверхневі тріщини.

### **9.1.3 Вплив атмосферного тиску**

Вплив *підвищеного атмосферного тиску* на РЕЗ зустрічається найчастіше пов'язаний з особливими умовами експлуатації, коли підвищений тиск створюється штучно.

Підвищений атмосферний тиск в першу чергу механічно впливає на елементи конструкції РЕЗ та може викликати їх деформацію і механічне пошкодження, включаючи порушення контактів, обриви і короткі замикання, порушення механічних фіксацій та ін.

Однак більш істотним є вплив *зниженого атмосферного тиску*. Він проявляється через такі явища:

- зменшується електрична міцність повітряних проміжків;

- погіршуються умови теплообміну конвекцією, що викликає додаткові перегріву виробів;
- в герметичних блоках виникають додаткові механічні напруження в стінках, кришках і деталях кріплення за рахунок перепаду тисків.

В умовах зниженого атмосферного тиску працюють, як правило, авіаційні, ракетні і космічні РЕЗ.

### 9.1.4 Вплив інших кліматичних факторів

Домішки у повітрі у вигляді піску, пилу, диму й промислових газів також є факторами впливу, які необхідно враховувати при експлуатації виробів.

**Пил** - суміш твердих часток у повітрі. Природний пил складається з космічної й земної частин. У вільну атмосферу осаджується 120...150 мм пилу за 100 років. Технічний пил утворюється при спалюванні палива, зношуванні й обробці деталей. Технічного пилу у високорозвинених країнах осаджується на два порядки більше, ніж природного.

Для більших міст серйозну проблему являють **димові гази**, що містять у великій кількості сірку, з якої утворюються сірчиста й сірчана кислоти, сполуки фтору, аміак, ціаністий водень, пари ртуті й інші активні шкідливі хімічні сполуки.

Домішки в повітрі можуть викликати порушення функціонування електричних елементів, змінювати режими теплообміну, викликати механічні ушкодження (пил, пісок), підсилювати корозійні процеси та інше.

**Сонячне випромінювання** являє собою електромагнітні хвилі з довжинами 0,2...5,0 мкм.

На ультрафіолетовий діапазон (довжина хвилі до 0,4 мкм) припадає 9% енергії, на видимий діапазон (довжина хвилі 0,4...0,7 мкм) - 41% і на інфрачервоний діапазон із довжинами хвиль більше 0,72 мкм - 50% сонячної енергії.

Вплив сонячного випромінювання на виробу полягає в хімічному розкладанні деяких органічних матеріалів. Найбільший вплив спричиняють ультрафіолетові промені, які мають найбільшу енергію. Під дією цих променів відбувається поверхневе окислювання матеріалів, часткове розкладання полімерів, що містять хлор, розщеплення органічних молекул, швидке старіння пластмас, зміна

найважливіших органічних компонентів і кольору в деяких типів термореактивних пластмас, утворення кірки на поверхні гуми і її розтріскування.

## **9.2 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.

### **9.2.1 Структура методики випробувань РЕЗ на кліматичні впливи**

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, витягнення з камер і відновлення (кінцева стабілізація властивостей);
- зовнішній огляд виробів і остаточні вимірювання параметрів виробу.

**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.

**Спосіб установки і положення виробів у камери** 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.

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. 9.1.

Таблиця 9.1 - Час витримки виробів для досягнення температури навколишнього середовища

<b>Маса виробу, кг</b>	<b>Час витримки, год.</b>
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 вказуються в ПВ і ТУ на виріб.

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

## 9.2.2 Особливості проведення випробувань на кліматичні впливи на різних стадіях проектування

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.

## 9.2.3 Нормалізована послідовність кліматичних 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.

Види випробувань на кліматичні впливи відповідно до стандарту [12] наведені у табл. 9.2.

Таблиця 9.2 - Види випробувань на кліматичні впливи

Найменування випробування	№ випробування
1	2
Випробування на вплив верхнього значення температури середовища при експлуатації	201
Випробування на вплив верхнього значення температури середовища при транспортуванні та збереженні	202
Випробування на вплив нижнього значення температури середовища при експлуатації	203
Випробування на вплив нижнього значення температури середовища при транспортуванні та збереженні	204
Випробування на вплив зміни температури середовища	205
Випробування на вплив інею з наступним відтаванням	206
Випробування на вплив вологості повітря: тривале; прискорене; в умовах випадіння роси	207
Випробування на вплив вологості повітря короткочасне	208
Випробування на вплив зниженого атмосферного тиску	209
Випробування на вплив підвищеного тиску повітря або іншого газу	210
Випробування на вплив сонячного випромінювання	211
Випробування на динамічний вплив пилу (піску)	212
Випробування на статичний вплив пилу (піску)	213
Випробування на вплив соляного туману	215
Випробування на вплив статичного гідравлічного тиску	216
Випробування на водонепроникненість	217
Випробування на вплив дощу	218
Випробування на краплезахищеність	219
Випробування на водозахищеність	220
Випробування на бризказахищеність	221
Випробування на працездатність в умовах ожеледі	222
Випробування на вплив швидкої зміни атмосферного тиску	223
Випробування на вплив нижнього значення вологості повітря або іншого газу	224

## 9.3 Випробування на температурні впливи

### 9.3.1 Випробування на вплив підвищеної температури (методи 201, 202)

Випробування на вплив підвищеної температури проводять з метою визначення здатності РЕЗ зберігати свої параметри і зовнішній вигляд в межах ТУ в процесі і після впливу верхнього значення температури.

Розрізняють два методи випробування РЕЗ на вплив підвищеної температури:

- випробування під термічної навантаженням;
- випробування під суміщеним термічним і електричним навантаженням.

Першому методу випробувань піддаються нетеплорозсіюючі вироби, температура яких в процесі експлуатації залежить тільки від температури навколишнього середовища, другому - теплорозсіюючі РЕЗ, які в робочому стані нагріваються за рахунок потужності, що виділяється під дією електричного навантаження.

Вироби, відібрані для випробувань, повинні задовольняти вимогам ТУ за зовнішнім виглядом і за значеннями параметрів, що контролюються.

**При випробуванні виробів тільки під термічним навантаженням** їх витримують при даній температурі протягом заданого часу.

**При випробуванні під суміщеним навантаженням** вироби поміщають в камеру і випробують під нормальним або максимально допустимим для даних виробів електричним навантаженням, що відповідає верхньому значенню температури зовнішнього середовища, яке встановлюється в залежності від ступеня жорсткості випробувань (табл. 9.3).

Час випробування на підвищені температури визначається часом, необхідним для досягнення випробовуваним виробом теплової рівноваги, а також часом витримки при цій температурі і вибирається з ряду: 2; 16; 72; 96 год.

Таблиця 9.3 - Ступені жорсткості випробувань на підвищені температури

Ступінь жорсткості	I	IV	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Температура, °С	40	50	70	85	100	125	155	200	250	315

Можливі два способи проведення випробування виробів, які розсіюють тепло.

При першому способі досягнення заданого температурного режиму виробів визначається контролем температури повітря в камері, яка встановлюється рівною верхньому значенню температури навколишнього середовища при експлуатації (зазначеному в ТУ).

При другому способі досягнення заданого температурного режиму виробів визначають контролем температури ділянки (блоку) виробу, який має найбільшу температуру або є найбільш критичним для працездатності виробу.

Випробування першим способом можливі, коли обсяг камери досить великий. Щоб імітувати умови вільного обміну повітря, в камері повинна бути відсутня примусова циркуляція повітря або її охолоджуваною дією можна знехтувати. Проведення випробування за першим способом можливо також у випадку, коли температура перегріву ділянки (вузла) виробу, визначена у НКУ (поза камерою), не перевищує 25°C, і різниця заданої температури повітря в камері при випробуванні і температури в НКУ не перевищує 35°C.

В інших випадках випробування теплорозсіюваних виробів слід проводити іншим способом.

Вимірювання параметрів випробовуваних виробів проводять після досягнення теплової рівноваги без вилучення виробів з камери. Для проведення вимірювань виріб підключають до зовнішніх комутаційних ланцюгів вимірювальної системи. Якщо вимірювання параметрів без вилучення з камери технічно неможливе, то допускається вилучення виробу з камери для вимірювання; однак при цьому час вимірювання не повинен перевищувати 3 хв., якщо інше значення часу спеціально не обумовлене в ТУ.

Для випробувань на підвищені температури застосовують спеціальні камери тепла.

На рис. 9.1 наведений зовнішній вигляд температурної камери AVT фірми Angelantoni Test Technologies S.r.l (Італія) [21]; на рис. 9.2 - нестандартної камери тепла великого розміру фірми KOMEG (КНР), [29].



Рисунок 9.1 - Температурна камера серії AVT фірми Angelantoni Test Technologies S.r.l (Італія)

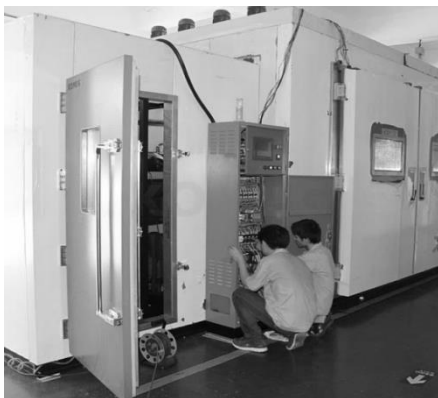


Рисунок 9.2 - Камера тепла великого розміру виробництва KOMEG (КНР)

Випробувальні камери фірми Angelantoni Test Technologies S.r.l (Італія), в яких можливе суміщення синусоїдальних коливань, як горизонтальних, так і вертикальних, з температурою, дозволяють імітувати динамічний процес, наприклад механічне і термічне навантаження, які впливають на деталі і прилади.

Основні технічні характеристики моделі AVT 1200 (C) 5:

- внутрішній об'єм камери, м <sup>3</sup>	1,22
- внутрішні розміри камери, мм	1000x1130x1080
- діапазон температур, °C	-40...+180
- маса, кг	2550
- габаритні розміри, мм	1490x3550x2350

Нестандартні камери великого розміру виробництва KOMEG (КНР) дають максимальні можливості для проведення випробувань та забезпечення надійності при випробуваннях нестандартних виробів.

Основні технічні характеристики моделі 21:

- внутрішній об'єм камери, м <sup>3</sup>	13,3
- внутрішні розміри камери, мм	4800x2100x4300
- діапазон температур, °C	-60...+120
- діапазон значень відносної вологості, %	30...95
- габаритні розміри, мм	5950x2350x4500

### **9.3.2 Випробування на знижену температуру (методи 203, 204)**

Випробування на вплив знижених температур проводять з метою перевірки параметрів виробів в умовах впливу низької температури зовнішнього середовища, а також після перебування їх в цих умовах.

Вироби поміщають в камеру холоду, після чого встановлюють значення найнижчої температури згідно зі ступенем жорсткості (таблиця 9.4).

Час витримки при заданій температурі вибирають в залежності від встановленої жорсткості випробувань з тимчасового ряду значень, наведених в ТУ. Проводяться вимірювання тих же параметрів, що і при випробуванні на вплив підвищених температур.

Таблиця 9.4 - Ступені жорсткості випробувань на холодостійкість

Ступінь жорсткості	III	IV	VII	VIII
Температура, °C	-10	-25	-45	-60

Для перевірки працездатності виробу передбачається витримка виробів під електричним навантаженням при заданій температурі.

Вимоги з розташування випробовуваних виробів аналогічні вимогам при випробуванні на вплив підвищених температур.

Для випробувань на знижені температури застосовують спеціальні камери холоду або частіше суміщені камери тепла і холоду.

На рис. 9.3 наведений зовнішній вигляд камери ультранизьких температур фірми OPERON (США) [21].

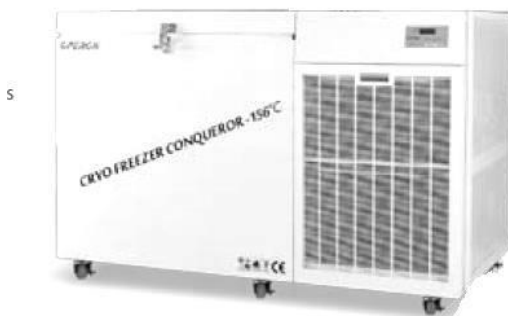


Рисунок 9.3 - Камера ультранизьких температур фірми OPERON (США)

У цих камерах за допомогою запатентованої технології можлива реалізація в невеликому об'ємі температури  $-156^{\circ}\text{C}$  без використання рідкого азоту.

Основні технічні характеристики моделі DFC-300:

- внутрішній об'єм камери,  $\text{м}^3$  0,3
- внутрішні розміри камери, мм 900x470x720
- діапазон температур,  $^{\circ}\text{C}$  -40/-55/-86
- маса, кг 290
- габаритні розміри, мм 1665x720x1101

### 9.3.3 Випробування на зміну температур (метод 205)

Випробування на зміну температур проводяться для визначення здатності виробів протистояти швидкій зміні температур.

Випробування проводяться одним з таких методів:

- метод двох камер;
- метод однієї камери;
- метод дворідинних ванн;
- комбінований метод.

**9.3.3.1 За методом двох камер** (швидка зміна температури) випробування проводять в камерах тепла і холоду без подачі на виробі електричного навантаження.

Вироби піддають дії трьох безперервно діючих один за одним циклів, якщо більша кількість циклів не встановлена в ТУ.

Кожен цикл складається з наступних етапів:

- вироби поміщають в камеру холоду і витримують протягом часу, встановленого в ТУ;
- після витримки в камері холоду вироби переносять в камеру тепла і витримують протягом певного часу (рис. 9.4 а).

**9.3.3.2 За методом однієї камери** (поступова зміна температури) випробування проводять без подачі на виробі електричного навантаження.

Вироби піддають дії двох безперервно діючих один за одним циклів.

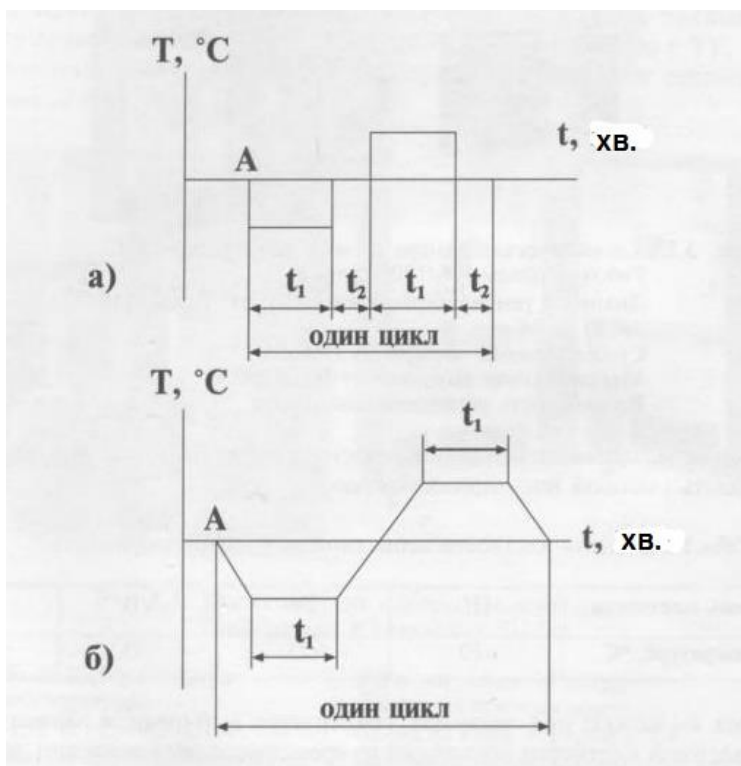
Кожен цикл складається з наступних етапів:

- вироби поміщають в камеру, після чого температуру знижують і витримують протягом часу, вказаного в ТУ;
- температуру в камері підвищують, витримують і знижують протягом певного часу (рис 9.4 б).

•

**9.3.3.3 За методом дворідинних ванн** (різка зміна температури) випробування проводять в двох ваннах з водою, в одній з яких вода має знижену, а в іншій підвищену температуру. Вироби піддають дії 10 циклів. Кожен цикл складається з наступних етапів:

- вироби занурюють у ванну з холодною водою;
- вироби занурюють у ванну з киплячою водою.



- а) при випробуванні методом двох камер;  
 б) при випробуванні методом однієї камери;  
 А - початок циклу,  $t_1$  - час витримки,  $t_2$  - час перенесення.

Рисунок 9.4 - Графіки зміни температури одного циклу

Для випробувань на зміну температур застосовують також спеціальні камери термоцикування.

Зовнішній вигляд камери термоцикування серії ESS виробництва KOMEG (КНР) наведений на рис. 9.5. Це - серія потужних кліматичних камер зі швидкою зміною температури, які використовуються для виконання гарячого і холодного циклування з різницею температури від 3 до 15 °C/хв. (залежно від температури) [29].



Рисунок 9.5 - Камера термоцикування серії ESS виробництва KOMEG (КНР)

Основні технічні характеристики моделі 408:

- внутрішній об'єм камери, м <sup>3</sup>	0,408
- діапазон температур, °C	-70...+100
- швидкість зміни температури, °C/хв.	5
- точність підтримання температури, °C	±3

**9.3.3.4 Випробування комбінованим методом** проводять в камерах вологості, тепла і холоду в наступному порядку:

- на вплив підвищеної вологості;
- на холодостійкість при температурі експлуатації;
- на теплостійкість в камері під електричним навантаженням;
- на вплив підвищеної вологості.

На рис. 9.6 наведений зовнішній вигляд програмованої кліматичної камери тепло-холод-волога серії КМН виробництва KOMEG (КНР) [29].

Кліматичні камери серії КМН дозволяють точно моделювати агресивну дія навколишнього середовища і застосовуються в науково-дослідних установах, які розробляють обладнання для машинобудування, а також оборонної, авіаційної та радіоелектронної промисловості.



Рисунок 9.6 - Програмована кліматична камера тепло-холод-волога серії КМН виробництва КОМЕГ (КНР)

Основні технічні характеристики моделі КМН-408R:

- внутрішні розміри камери, мм	700x750x800
- діапазон температур, °C	-20...+150
- час нагріву від -20°C до +100 °C, хв.	35
- час охолодження від +20°C до -20 °C, хв.	45
- діапазон відносної вологості, %	20...98
- маса, кг	400
- габаритні розміри, мм	980x1940x1740

Принципи дії обладнання для випробувань на температурні впливи та деякі засоби вимірювань, що лежать в основі його роботи, розглянуті детальніше у розд. 10.

#### **9.4 Випробування на вплив підвищеної вологості (методи 207, 208)**

Вологостійкістю називають здатність апаратури зберігати працездатність в умовах підвищеної відносної вологості.

Розрізняють два види випробування на вологостійкість: тривалі і короткочасні.

**Тривалі випробування** проводяться з метою визначення здатності виробів зберігати свої параметри в умовах і після тривалого впливу вологості.

**Короткочасні випробування** проводяться з метою оперативного виявлення грубих технологічних дефектів в серійному виробництві і дефектів, які могли виникнути в попередніх випробуваннях.

Обидва види випробувань на вологостійкість можуть проводитися в безперервному (без конденсації вологи) або циклічному (з конденсацією вологи) режимах.

Конкретний метод випробування встановлюється в залежності від призначення і умов експлуатації виробів.

#### **9.4.1 Випробування без конденсації вологи - безперервний режим**

У безперервному режимі випробувань не передбачається конденсації вологи на виробках, тому безперервні випробування проводять при постійних значеннях температури і вологості в камері.

Вироби поміщають в камеру вологості і витримують при температурі, зазначеній в табл. 9.5.

Для кожного з видів випробувань час витримки виробів при заданій температурі визначається необхідністю досягнення виробом теплової рівноваги. Потім відносну вологість повітря в камері підвищують до  $95 \pm 3\%$  і далі підтримують її і температуру постійними протягом усього часу випробування.

Таблиця 9.5 - Тривалість випробувань (сутки) на вологостійкість при безперервному режимі в залежності від ступеня жорсткості

Температура повітря, °С	Ступінь жорсткості						
	Тривале випробування				Прискорене випробування		
	II	III,IV,VI	V,VII	VIII	III,IV	V,VIII	VIII
25±2	2	-	-	-	-	-	-
40±2	-	10	21	56	-	-	-
55±2	-	-	-	-	4	7	14

### 9.4.2 Випробування з конденсацією вологи - циклічний режим

Циклічний режим випробування характеризується впливом підвищеної вологості при циклічній зміні температури в камері. В результаті створюються умови для випадання роси на зовнішніх поверхнях виробів (при швидкому зниженні температури) і подальшого її випаровування (в період підвищення температури), що сприяє інтенсивному розвитку процесів корозії.

При зниженні температури волога в камері може проникати всередину виробів через різні мікроканали в зварних, паяних швах, місцях з'єднання матеріалів і т.ін. Фізичний механізм цього явища полягає в наступному. При зниженні температури в камері повітря у внутрішній порожнині випробовуваного виробу охолоджується і тиск зменшується. За рахунок виникаючого перепаду тисків в навколишньому середовищі і всередині порожнини волога дифундує по капілярах всередину цієї порожнини (корпусу).

З урахуванням цього випробування на вологостійкість в циклічному режимі слід рекомендувати в першу чергу для виробів, які мають вільні внутрішні порожнини, наприклад для виробів в пластмасових корпусах з вільним внутрішнім об'ємом, металоскляних і металокерамічних корпусах з вільним об'ємом і т.ін.

У разі тривалого випробування на вологостійкість при циклічному режимі загальна тривалість випробування в залежності від ступеня жорсткості вибирається з табл. 9.6.

Таблиця 9.6 - Тривалість випробувань (сутки) на вологостійкість при циклічному режимі в залежності від ступеня жорсткості

Температура повітря, °С	Ступінь жорсткості				
	Тривале випробування			Прискорене випробування	
	III,IV,VI	V,VII	VIII	V,VII	VIII
40±2	4	9	21	-	-
55±2	-	-	-	4	9

В умовах короткочасних випробувань на вологостійкість при циклічному режимі виробу піддаються впливу чотирьох або дев'яти

циклів, тривалість кожного з яких становить 24 години. Кількість циклів встановлюється у ТУ в залежності від конструкції і призначення виробів.

Існують два методи випробувань з конденсацією вологи.

#### 9.4.2.1 Циклічний режим 16 + 8 годин

Випробування проводять без електричного навантаження. Вироби піддають дії безперервно послідовно діючих один за одним циклів (рис. 9.7).

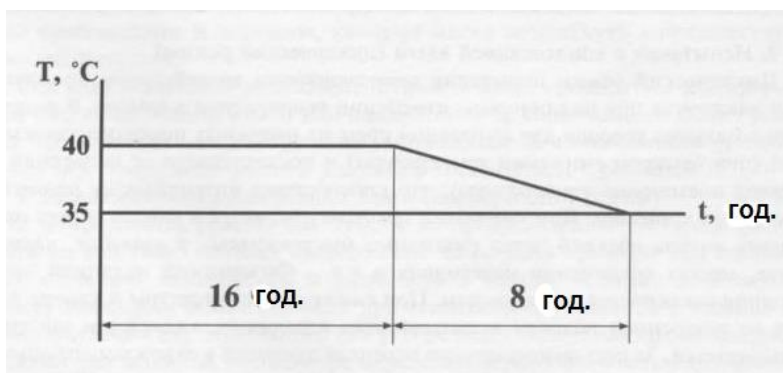


Рисунок 9.7 - Етапи кожного циклу (16+8 год.) при випробуванні на підвищену вологість

Кожен цикл складається з двох частин.

У першій частині циклу вироби протягом 16 годин піддають дії відносної вологості  $(93 \pm 3)\%$  при температурі, зазначеній на рис 9.5.

У другій частині циклу виріб в камері охолоджують протягом 8 годин до температури не менше ніж на  $5^{\circ}\text{C}$  нижче зазначеної на рис 9.7. Відносна вологість при цьому повинна бути  $(94 \dots 100)\%$ .

#### 9.4.2.2 Циклічний режим 12 + 12 годин

Випробування проводять у камері вологи, яка повинна підтримувати випробувальний режим з відхиленнями, що не перевищують зазначені на рис. 9.8.

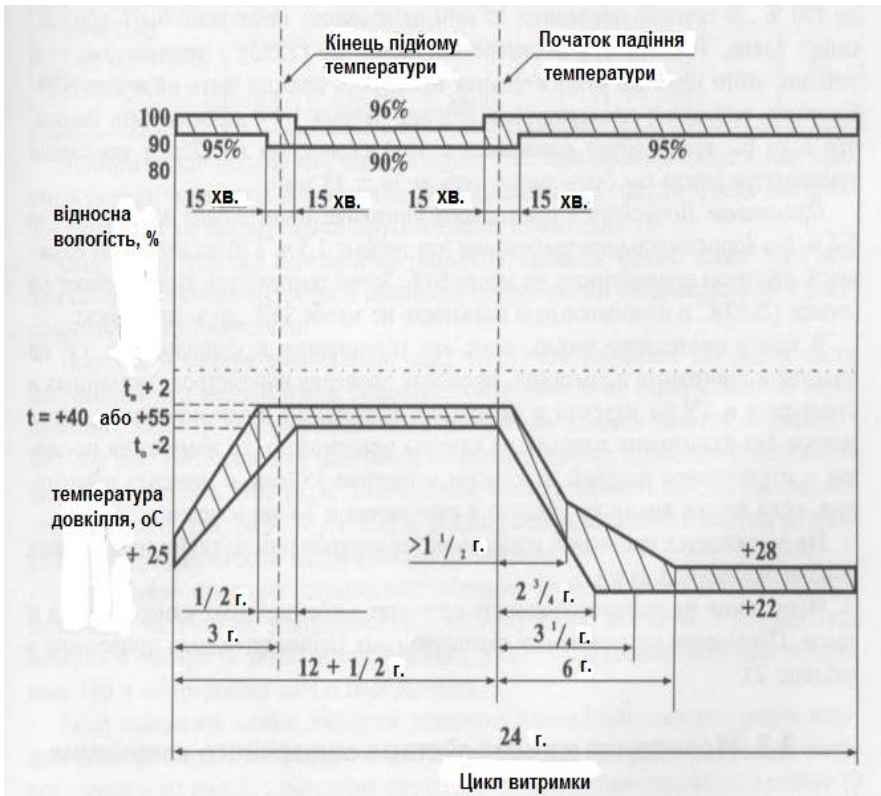


Рисунок 9.8 - Етапи кожного циклу (12 + 12 год.) при випробуванні на підвищену вологість

Вироби випробують без електричного навантаження. Вироби, у яких при зволоженні під напругою може проявлятися руйнівна дія електролізу або електрохімічної корозії, випробують з додаванням електричної напруги.

Вироби витримують в НКУ протягом часу, зазначеного в стандартах і ТУ на вироби і в ПВ.

Вироби встановлюють в камері і піддають дії безперервно послідовно діючих один за одним циклів тривалістю 24 год. кожен.

Кількість циклів встановлюють в стандартах і ТУ на виробі і ПВ і вибирають з табл. 9.7.

Таблиця 9.7 - Режими випробувань на підвищену вологість при циклічному режимі (12 + 12 год.)

Характеристика випробувань	Тривале випробування для ступенів жорсткості			Прискорене випробування для ступенів жорсткості	
	IV, XII	V	IX	V	IX
Загальна тривалість витримки (кільк. циклів)	6	12	21	4	9
Верхня температура, °C	40±2	40±2	40±2	55±2	55±2

Підвищення температури і вологості при проведенні кожного циклу має бути досить швидким, щоб забезпечити конденсацію вологи (випадання роси) на виробих.

У камері встановлюють температуру (25±2)°C і відносну вологість не менше 95%. Температуру в камері підвищують до температури зазначеної в табл. 9.7 протягом (3±0,5) год. Протягом цього періоду відносна вологість повинна бути не менше 95%, за винятком останніх 15 хв., протягом яких вона повинна бути не менше 90%. На виробих в цей період повинен утворитися конденсат.

У камері підтримують температуру, зазначену в табл. 9.7 протягом (12±0,5) год. від початку циклу.

Відносна вологість в цей період повинна бути (93±3)% за винятком перших і останніх 15 хв., коли вона повинна бути в межах від 90 до 100%. Протягом останніх 15 хв. на виробих не повинно бути конденсації вологи. Температуру в камері знижують до (25±3)°C протягом 3...6 год. Протягом цього періоду відносна вологість повинна бути не менше 95%.

Швидкість зниження температури протягом перших 1,5 год. повинна бути такою, що якби температура знижувалася з цією швидкістю до (25±3)°C, зазначена температура могла б бути досягнута за 3 год. ± 15 хв.

Допускається проводити зниження температури до (25±3)°C за 3...6 год. без додаткової вимоги для перших 1,5 год., а відносно

вологість при цьому підтримувати не менше 80%. Потім температуру витримують на рівні  $(25\pm 3)$  °C і відносну вологість не менше 95% до кінця циклу.

В кінці останнього циклу, якщо це встановлено в стандартах і ТУ на виріб і програму випробувань, проводять перевірку параметрів, зазначених в стандартах і ТУ на вироби та програмою випробувань. Якщо вимірювання параметрів без вилучення виробів з камери неможливо, то вимірювання проводять з витяганням виробів з камери протягом 15 хв. з моменту вилучення, якщо інший час не вказаний в стандартах і ТУ на вироби.

Не допускається проводити вимірювання параметрів при наявності на виробах конденсованої вологи.

Випробування на підвищену вологість найчастіше проводять у комбінованих кліматичних камерах температури-вологості

На рис. 9.9 наведений зовнішній вигляд комбінованої кліматичної камери тепла-холоду-вологості-очищення повітря серії TH-CR (Jeio Tech) (Республіка Корея) [29].

Це - чиста кліматична камера, створена для процесів, що вимагають високочистих і контрольованих умов випробувань. (Клас чистоти повітря ISO 5 згідно ISO 14644-1). Чистоту умови випробування забезпечує термостійкий фільтр HEPA. Частинки розміром 0,3 мкм і більше віддаляються з ефективністю 99,99%.

#### Основні технічні характеристики моделі TH-CR-270:

- внутрішні розміри камери, мм	600x700x648
- діапазон температур без вологості, °C	-35...+120
- діапазон температур з вологістю, °C	+20...+85
- час нагріву від -35°C до +120 °C, хв.	60
- час охолодження від +20°C до -35 °C, хв.	65
- діапазон відносної вологості, %	30...90
- клас чистоти	100 (ISO 14644-1)
- маса, кг	400
- габаритні розміри, мм	1180x1120x1935

Принципи дії обладнання для випробувань на підвищену вологість та деякі засоби вимірювань, що лежать в основі його роботи, розглянуті детальніше у розд. 10.



Рисунок 9.9 - Комбінована кліматична камера тепла-холоду-вологості-очищення повітря серії TH-CR (Jeio Tech) (Республіка Корея).

### **9.5 Випробування на вплив інею і роси (метод 206)**

Випробування цього виду проводять з метою перевірки здатності виробів витримувати номінальну електричну напругу при конденсації на них інею і роси.

Випробування на вплив атмосферних конденсованих опадів в лабораторних умовах проводять в камерах холоду, вологості і термобарокамерах.

Перед початком і після випробування вироби витримують при НКУ, якщо інші умови з більш жорсткими допусками не обумовлені в НТД або ПВ, і вимірюють параметри, зазначені в стандартах і ТУ на виріб і ПВ, в тому числі проводять перевірку повним значенням випробувальної напруги.

Порядок випробувань наступний:

- вироби поміщають в камеру холоду і витримують при температурі  $20 \pm 5$  °С протягом 2 год.;

- вироби витягують з камери, поміщають в НКУ, після чого на вироби подають електричну напругу, причому, вид напруги, її значення, час витримки і місце для подавання встановлюють в НД або ПВ.

Вважають, що вироби витримали випробування, якщо при подачі напруги не відбулося пробою.

## 9.6 Випробування на вплив соляного туману (метод 215)

Випробування проводять з метою визначення корозійної стійкості виробів в атмосфері, насиченій водними розчинами солів.

Вироби поміщають в камеру, температуру в якій встановлюють  $27 \pm 2^\circ\text{C}$ , і піддають дії соляного туману. Вироби розташовують у камері так, щоб в процесі випробування бризки розчину з пульверизатора або аерозольного апарату, а також краплі зі стелі, стін і системи підвісів потрапляли на вироби.

Якщо виріб експлуатують в захисній оболонці, він повинен проходити випробування у ній.

Туман утворюється розпилювачем - відцентровим аерозольним апаратом або пульверизатором соляного розчину, який готують, розчиняючи в дистильованій (деіонізованій) воді хлористий натрій.

Розчин розпилюють на протязі 15 хв. через кожні 45 хв.

Туман повинен мати дисперсійність 1...10 мкм (95% крапель) і водність 2-3 г / м<sup>3</sup>.

Після закінчення випробування вироби промивають в дистильованій воді, після чого вони повинні бути просушеними.

Загальний час випробування становить 2; 7 або 10 діб. Конкретний час випробування встановлюється в стандартах і ПВ.

Вважається, що вироби витримали випробування, якщо вони за зовнішнім виглядом задовольняють вимогам ТУ або стандарту на вироби для даного виду випробувань.

На рис. 9.10 наведений зовнішній вигляд камери соляного туману KOMET серії HL (КНР) [28], на рис. 9.11 - камери морського туману серії DCTC [21].



Рисунок 9.10 - Камера соляного туману КОМЕГ серії НЛ (КНР)

Камера соляного туману КОМЕГ серії НЛ являє собою прецизійну камеру соляного туману, що дозволяє визначити корозійну стійкість продукції з лакованим, масляним, гальванічним або анодованим покриттям. Вона широко використовується в сфері виробництва побутових приладів, електроніки, гальванотехніки, телекомунікацій тощо. Дане обладнання дозволяє оцінити властивості продукції в певних умовах, створюючи для неї корозійну середу. Управління здійснюється за допомогою сенсорного регулятора.

Основні технічні характеристики моделі КМ-F-90А:

- об'єм камери, м <sup>3</sup>	0,27
- внутрішні розміри камери, мм	900x600x500
- діапазон температур, °С	+35...+55
- температура всередині камери, °С: для PH NSS (6.5-7.2); AASS (3.1-3.3)	+35±1
для PH CASS (3.1-3.3)	+50±1
- температура солоної води, °С:	+35±1
- об'єм резервуару з солоною водою, м <sup>3</sup>	0,015
- габаритні розміри, мм	1380x800x1150



Рисунок 9.11 - Камера морського туману DCTS

Камери серії DCTS призначені для проведення випробувань на вплив морської води і морського (соляного) туману. Поряд з випробуванням морським туманом, тут також можливе випробування конденсатом. Випробування у цих камерах дозволяє оптимізувати стійкість матеріалів конструкцій та ЕРЕ до морської води і солі для посипання доріг, підвищити захист виробів від корозійного впливу при високій вологості повітря. Корозійна стійкість означає не тільки безпеку, але і високу якість. Камери додатково оснащені системою кондиціонування повітря і вимірювання вологості.

Основні технічні характеристики моделі DCTS 1200 PN:

- об'єм камери, м <sup>3</sup>	1,105
- внутрішні розміри камери, мм	1700x640x1090
- діапазон температур, °C	+15...+55
- температура солоної води, °C:	+35±1
- маса, кг	220
- габаритні розміри, мм	2280x830x1320

Конструкції та основні параметри сучасних камер соляного туману можна також глянути у [21], [22], [23], [28], [29].

## 9.7 Випробування на зовнішній вплив води (методи 207 - 220)

За ступенем захисту від впливу води вироби випускають в чотирьох виконаннях: В1, В2, В3, В4.

Вироби повинні бути працездатні і зберігати свої характеристики за таких умов:

- В1: вплив дощу, що падає під кутом не більше  $60^\circ$  до вертикалі;
- В2: вплив бризок води, що падають в будь-якому напрямку;
- В3: вплив струменів води, що падають в будь-якому напрямку;
- В4: повне зануренні у воду.

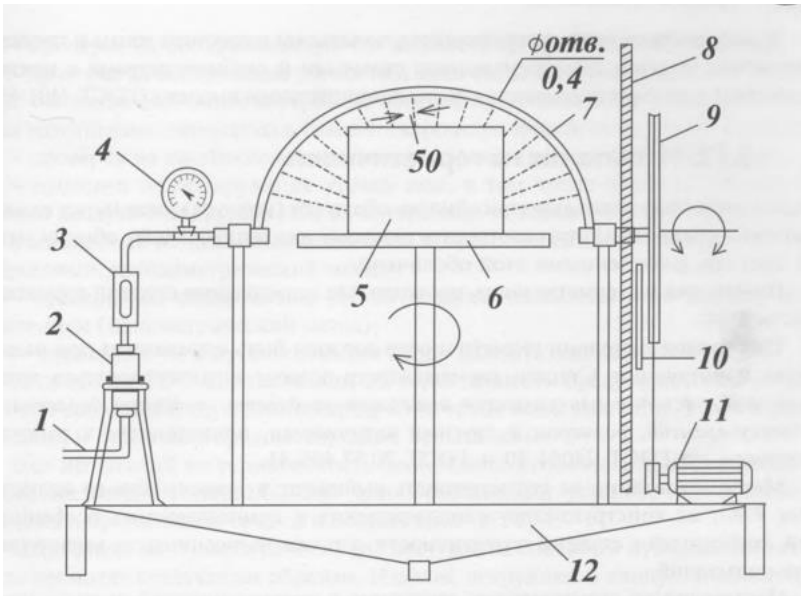
**Випробування виробів виконання В1** проводять на випробувальній установці (рис. 9.12) шляхом подачі на виріб води, що проходить через отвори в трубці, яка хитається (7).

Трубка з внутрішнім діаметром 18 мм у вигляді півкільця має за всією довжиною на внутрішньому боці отвори діаметром 0,4 мм, розташовані через 50 мм.

Трубка виконує коливальні рухи з відхиленням на кут  $60^\circ$  від вертикалі в обох напрямках зі швидкістю 1,05 рад/с ( $60^\circ$  в 1 с).

Радіус дуги трубки повинен бути найменшим в залежності від габаритних розмірів виробів (вибирається з ряду 160; 250; 400; 630 мм). Тиск води біля входу в трубку 0,1 МН/м<sup>2</sup>.

Виріб встановлюють на ґратчастому столі (6), що забезпечує проходження води до виробу, який обертається навколо вертикальної вісі з частотою 1 об. / хв. Тривалість дії 10 хв. Під час випробування виріб повинен повертатися навколо вертикальної вісі. Інтенсивність дощу вимірюють в місці розташування виробу протягом не менше 30 с за допомогою циліндричного збірника діаметром від 10 до 20 см і заввишки не менше половини діаметра.



1 - введення води; 2 - фільтр; 3 - ротаметр; 4 - манометр; 5 - апаратура, що випробується; 6 - стіл; 7 - трубка; 8 - захисний щиток; 9 - шків; 10 - щиток кінцевих вимикачів; 11- електродвигун реверсивний; 12 - піддон для зливу води

Рисунок 9.12 - Схема установки для випробувань на зовнішній вплив води

**Випробування виробів виконання В2 на бризказахисність** проводять за методикою, наведеною вище для виконання В1, за умови, якщо коливальна трубка відхиляється на кут  $170^\circ$  від вертикалі в обох напрямках зі швидкістю  $1,48$  рад/с. Окропленням тривалістю  $10$  хв. піддають по черзі чотири основні сторони виробу.

При розміщенні в випробувальній установці необхідно враховувати експлуатаційне положення.

Зона дії бризок повинна перекривати габаритні розміри виробів не менш ніж на  $30$  см, напрямок падіння має становити кут  $45^\circ$  з площиною розташування виробів.

Температура води в початковий момент випробувань повинна бути нижче температури виробів на  $10...15^\circ\text{C}$ .

Вироби протягом 2 год. піддають дії бризок з інтенсивністю 5 або 3 мм/хв.

Вироби, які в умовах експлуатації можуть піддаватися безпосередній дії крапель, повинні бути стійкі до впливу, верхнє значення інтенсивності якого 5 мм/хв., за винятком виробів, розрахованих на напругу вище 1000 В, виконаннях для помірного і холодного клімату (виконання У і ХЛ), для яких верхнє значення інтенсивності бризок становить 3 мм/хв.

**Випробування виробів водозахищеного виконання В3** проводять для перевірки здатності оболонок (кожухів) виробів не пропускати воду при накаті хвиль.

Для цього вироби обливають по черзі з усіх боків струменем води з циліндричної насадки з відстані 1,5 м від виробу. Тиск води перед насадкою має бути  $0,2 \text{ МН/м}^2$ , діаметр отвору насадки 50-75 мм.

Тривалість дії 15 хв.

**Випробування виробів виконання В4** на водонепроникність проводять для перевірки стійкості параметрів РЕЗ після перебування їх у воді.

Для цього вироби опускають у воду, що має температуру  $20 \pm 10^\circ\text{C}$ , на глибину 0,5...1,0 м.

Тривалість дії води повинна бути не менше 30 хв.

Після випробувань зовнішні поверхні виробу насухо протирають і розкривають, щоб встановити відсутність вологи всередині корпусу.

Результати випробувань вважаються задовільними, якщо після дослідження всередині виробу не буде виявлено слідів води, параметри відповідають параметрам і вимогам, зазначеним в стандартах і ПВ для даного виду (В1, В2, В3, В4) виконань.

## **9.8 Випробування на вплив тиску - атмосферного та гідростатичного**

### **9.8.1 Випробування на вплив зниженого атмосферного тиску (метод 209)**

Випробування на вплив зниженого атмосферного тиску проводять з метою перевірки стійкості параметрів і збереження зовнішнього вигляду виробу в умовах зниженого атмосферного тиску.

Слід зауважити, що при значному зниженні атмосферного тиску суттєво порушується конвекційний теплообмін, тому випробування слід проводити у термобарокамерах при підвищеній температурі.

Випробування на вплив зниженого атмосферного тиску проводять одним з таких методів:

- при нормальній температурі та при підвищеній робочій температурі для виробів, призначених для роботи при тиску 6,7 кПа і вище;
- при підвищеній робочій температурі для виробів, призначених для роботи при тиску нижче 6,7 кПа.

Перший метод застосовують для випробування нетепловиділяючих виробів, а також для випробування тепловиділяючих виробів, для яких нагрів при електричному навантаженні, нормованому для зниженого атмосферного тиску, не є критичним.

Для забезпечення відтворюваності результатів випробувань тепловиділяючих виробів на вплив зниженого атмосферного тиску необхідно правильно вибрати співвідношення площі поверхні, що оточує виріб, і загальної площі поверхні виробу за методикою, наведеною у [12].

Випробування проводять в термобарокамері, яка повинна забезпечувати випробувальний режим з відхиленнями, що не перевищують зазначені в стандарті, ТУ або ПВ.

Спосіб установки і положення виробів при випробуваннях, а також мінімальні допустимі відстані між виробами в термобарокамері встановлюють в стандартах, ТУ на вироби і ПВ. Визначення мінімальних допустимих відстаней між тепловиділяючими виробами в термобарокамері проводять відповідно до [12].

При випробуванні виробів, призначених для роботи при напрузі нижче 300 В, тиск повітря в термобарокамері встановлюють відповідно зі ступенем жорсткості в залежності від пониженого атмосферного тиску і підвищеної температури за ТУ на вироби і ПВ, Потім проводять перевірку параметрів виробів.

Для виробів, призначених для роботи при тиску 0,67 кПа та вище і напрузі нижче 300 В, тиск в термобарокамері плавно знижують від 1,33 кПа до значення, встановленого в стандартах, ТУ на вироби і ПВ. Протягом всього часу зміни тиску перевіряють параметри, що залежать від електричної міцності повітряних проміжків.

При випробуванні виробів, призначених для роботи при тиску не вище 0,67 кПа і напрузі не нижче 300 В, тиск в барокамері встановлюють 1,33 кПа. Потім тиск плавно знижують до значень згідно з ступенем жорсткості, при цьому протягом всього часу зміни тиску перевіряють параметри, що залежать від електричної міцності повітряних проміжків. Перелік цих параметрів встановлюють в стандартах, ТУ на вироби і ПВ.

Вироби витримують в умовах зниженого тиску повітря протягом часу, зазначеного в стандартах і ПВ. Після закінчення часу витримки перевіряють параметри, не витягуючи вироби з камери.

### **9.8.2 Випробування на вплив підвищеного атмосферного тиску (метод 210)**

Випробування на вплив підвищеного атмосферного тиску проводять з метою перевірки стійкості параметрів і збереження зовнішнього вигляду виробу в умовах підвищеного атмосферного тиску.

Випробування проводять у такий спосіб: апаратуру поміщають в барокамеру, тиск в якій доводять до заданого значення, витримують при цьому тиск протягом часу, встановленого в стандартах, ТУ або ПВ, і проводять перевірку параметрів апаратури; потім тиск в камері плавно знижують до нормального, після чого виріб витягають з камери, піддають зовнішньому огляду, перевіряють параметри.

Вважається, що вироби витримали випробування, якщо в процесі випробування і після нього вони задовольняють вимогам, встановленим в ТУ, стандартах і ПВ для даного виду випробувань.

При складанні вимог і основних положень до проведення випробувань на вплив атмосферного тиску слід користуватися [12].

Випробування на вплив підвищеного тиску проводять у спеціальних барокамерах, на вплив зниженого тиску - у термобарокамерах.

Зовнішній вигляд барокамери фірми KOMEG серії KU (КНР) наведений на рис. 9.13 [28].



Рисунок 9.13 - Барокамера фірми KOMEG серії KU (КНР)

Барокамера призначена для випробувань при нормальному та зниженому атмосферному тиску у широкому діапазоні температур.

Основні технічні характеристики моделі KU-504S:

- внутрішні розміри камери, мм	800x900x700
- діапазон температур, °C	-70...+150
- діапазон температур з вологістю, °C	+20...+85
- час нагріву від +25°C до +150°C, хв.	< 90
- час охолодження від +20°C до -70°C, хв.	< 90
- діапазон тиску	від атм. до 1,0 кПа
- габаритні розміри, мм	1610x1990x2450

Конструкції та основні параметри сучасних баро- та термобарокамер можна також глянути у [21], [23], [28], [29].

### **9.8.3 Випробування на вплив підвищеного гідростатичного тиску (метод 216)**

Мета випробування - визначення здатності виробів зберігати свої параметри в умовах перебування під водою.

Випробування проводять наступним чином:

- вироби поміщають в бак, в якому створюють гідростатичний тиск, встановлений в ТУ або стандартах;
- при цьому тиску вироби витримують протягом 15 хв., після чого тиск знижують до нормального значення;
- тиск повторно підвищують до значення, відповідного граничної глибини занурення та витримують вироби при цьому тиску протягом 24 год., причому в кінці проводять вимірювання параметрів зазначених у стандартах і ПВ для даного виду випробувань;
- тиск знижують до нормального і, не витягуючи вироби з води, перевіряють параметри, зазначені в стандартах і ПВ.

Після вилучення виробу з води проводять перевірку параметрів, зазначених в стандартах і ПВ. Вважають, що вироби витримали випробування, якщо в процесі і після випробування вони задовольняють вимогам, встановленим в НТД або ПВ.

### **9.9 Випробування на вплив пилу**

Існує два методи випробувань на вплив пилу:

- випробування на вплив статичного пилу (піску);
- випробування на вплив динамічного пилу (піску).

В обох випадках випробування виробів на вплив пилу проводять в пилонапроникній камері, корисний об'єм якої повинен перевищувати об'єм виробу не менше ніж в 5 разів. В камеру, забезпечену пристроєм для безперервної циркуляції повітря, перед випробуваннями зі швидкістю 0,5...15 м/с загрузають пилову суміш об'ємом 0, 1% корисного об'єму камери.

#### **9.9.1 Випробування на вплив статичного пилу (метод 213)**

Випробування апаратури при дії статичного пилу проводять для перевірки здатності виробів працювати в середовищі з підвищеною концентрацією пилу.

Вироби поміщають в камеру і розміщують на ґратчастому столі таким чином, щоб вплив пилу був найбільш ефективним і відповідав можливому впливу пилу в умовах експлуатації.

Спосіб установки виробів вказують в стандартах, ТУ на вироби і ПВ.

Температура повітря в камері повинна бути  $55 \pm 3^\circ\text{C}$  при відносній вологості не більше 50%.

Пилова суміш повинна складатися з флюоресцентного порошку (10%), наприклад люмінофора ФКП-03 (сульфід цинку), що проходить крізь сито з сіткою N005, кварцового піску (60%), крейди (15%), каоліну (15%), що проходить через сито N014.

Швидкість циркуляції повітря в камері до початку осідання пилу повинна бути 0,5...1 м / с.

Після циркуляції повітря в камері і подальшого осідання пилу протягом 2 год. апаратуру витягують з камери, видаляють пил з зовнішніх поверхонь, розкривають і опромінують ультрафіолетовим світлом, щоб встановити проникненість пилу у виріб. При цьому рекомендується користуватися лампами ультрафіолетового випромінювання типу ПРК зі світлофільтрами марки УФС.

### **9.9.2 Випробування на вплив динамічного пилу (метод 212)**

Випробування проводять для перевірки стійкості виробів до руйнівного (абразивного) впливу пилу.

Вироби поміщають в камеру пилу і розташовують таким чином, щоб вплив пилу був найбільш ефективним і відповідав можливому впливу пилу в умовах експлуатації.

Вироби піддають дії пилової суміші, що знаходиться в підвішеному стані в камері, протягом 4 год. Потім протягом 2 год. відбувається осідання пилу без циркуляції повітря в камері.

Пилова суміш містить кварцовий пісок (70%), крейду (15%) і каолін (15%), що проходить через сито з сіткою N0224.

Швидкість циркуляції повітря в камері до осідання пилу повинна бути 10...15 м / с.

Вважається, що вироби витримали випробування, якщо в процесі або після випробування їх параметри задовольняють вимогам, встановленим в стандартах, ТУ і ПВ для даного виду випробувань.

Для проведення випробувань на вплив статичного та динамічного пилу використовуються спеціальні камери пилу.

Зовнішній вигляд камери статичного пилу наведений на рис. 9.14, динамічного пилу - на рис. 9.15 [29].



Рисунок 9.14 - Камера статичного пилу та піску КП

Камера піску і пилу КП призначена для випробувань на визначення ступеня захисту виробів на стійкість до статичного впливу пилу і піску згідно стандартів.

Основні технічні характеристики камери КП-1000:

- внутрішні розміри камери, мм	1000x1000x1000
- діаметр металевої сітки, мкм	50
- номінальна відстань між лініями, мкм	75
- кількість порошку талька, кг/м <sup>3</sup>	2...4
- максимальна тривалість випробувань	99 год. 59 хв.
- габаритні розміри, мм	1250x1420x1820



Рисунок 9.15 - Камера динамічного пилу та піску КД

Камера КД призначена для проведення випробувань великогабаритних виробів і їх складових частин на стійкість до статичного і динамічного (абразивного) впливу піску і пилу за стандартами.

Основні технічні характеристики камери КП-1,0/Д:

- внутрішні розміри камери, мм	1000x1000x1000
- корисний об'єм, м <sup>3</sup>	1,0
- концентрація суміші пилу, г/м <sup>3</sup>	2...10
- швидкість повітряного потоку, м/с	0,5...15
- діапазон температур, оС	+15...+65
- габаритні розміри, мм	5000x2500x1600

Конструкції та основні параметри сучасних камер пилу та піску можна також глянути у [21], [23], [28], [29].

## 9.10 Випробування на вітростійкість

Вітростійкістю називають здатність РЕЗ зберігати при впливі вітру свої характеристики в межах норм, встановлених в стандартах, ТУ або ПВ.

Для IV-VII ступенів жорсткості в ТУ допускається встановлювати вимоги з вітростійкості.

Випробування РЕЗ IV-VII ступенів жорсткості на вітростійкість проводять наступним чином:

- після вимірів в НКУ характеристик, встановлених для випробувань даного виду в стандартах або ТУ, виріб включають і встановлюють в робочому положенні в аеродинамічній трубі або під вентиляційною установкою, що забезпечують повітряний потік;

- виріб включають і обдувають повітряним потоком під різними кутами (через  $45^\circ$ ) по 5...10 хв. в кожному положенні (в напрямку найбільшої парусності тривалість обдуву повинна бути 20 хв.);

- при впливі повітряного потоку перевіряють необхідні характеристики;

- припиняють подачу повітря і вимикають виріб;

- виріб вдруге обдувають повітряним потоком зі швидкістю не менше 50 м/с під кутами через  $45^\circ$  по 5...10 хв. в кожному положенні (в напрямку найбільшої парусності тривалість обдуву повинна бути 20 хв.);

- після перебування в НКУ протягом часу, встановленого в стандартах або ТУ, виріб включають і після закінчення часу встановлення робочого режиму перевіряють необхідні характеристики.

У тому випадку, коли вітер є фактором, що істотно впливає на РЕЗ (наприклад РЛС, антени тощо), при розробці та випробуванні РЕЗ необхідно розглядати характеристики вітру за стандартами.

Характеристики вітру розподіляються за чотирма широтними зонами і представницькими пунктами з екстремальними сильними і слабкими вітрами в кожній широтній зоні і розраховуються з урахуванням геопотенціальності висот.

## **9.11 Випробування на вплив сонячного випромінювання (метод 211)**

Випробування проводять для перевірки збереження зовнішнього вигляду виробів або їх окремих деталей і складальних одиниць, а також їх параметрів після впливу сонячного випромінювання.

Даному виду випробувань підлягають РЕЗ, їх конструктивні елементи і покриття, виконані з органічних матеріалів, які не піддавалися іншим видам випробувань.

Опромінення виробів або деталей (кожухів, кришок, ручок, шкал і т.ін.) здійснюють в камері сонячної радіації джерелами інфрачервоного і ультрафіолетового випромінювання.

Вироби в камері розташовують так, щоб їх найбільш уразливі частини знаходилися під впливом джерела опромінення і не було взаємної екранізації.

Спектр ультрафіолетового випромінювання повинен лежати в межах 280...400 нм. Інтегральна щільність теплового потоку сонячного випромінювання повинна складати  $1120 \text{ Вт/м}^2 \pm 10\%$ , в тому числі щільність потоку ультрафіолетової частини спектра  $68 \text{ Вт/м}^2 \pm 25\%$ .

У камері здійснюють перевірку впливу ультрафіолетової частини спектра на виріб.

Випробування проводять у такий спосіб: вироби поміщають в камеру, включають джерела ультрафіолетового випромінювання, після чого температуру повітря в камері (в тіні) встановлюють  $55 \pm 2^\circ\text{C}$ . Вироби опромінюють протягом 120 год. безперервно або з перервами.

Якщо основною метою є перевірка взаємодії ультрафіолетової частини спектра з нагріванням, випробування проводять за режимом, графік якого вказаний на рис. 9.16, при цьому тривалість випробування становить 10 циклів.

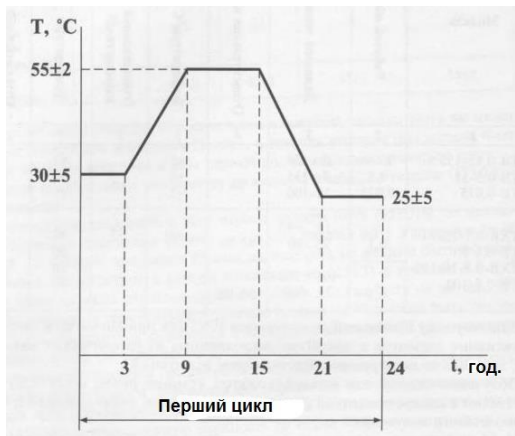


Рисунок 9.16 - Режим випробування на вплив сонячної радіації

Після закінчення випробування вироби виймають з камери і проводять їх зовнішній огляд і вимірювання параметрів, зазначених в стандартах, ТУ або ПВ. Контролю підлягають параметри, стабільність яких залежить від стану конструктивних деталей або складальних одиниць з органічних матеріалів (або мають органічні покриття), що зазнають безпосереднього опромінення.

Вважається, що вироби витримали випробування, якщо в процесі і після випробувань вони задовольняють вимогам, встановленим в стандартах і ТУ на вироби і ПВ для даного виду випробувань.

На рис. 9.17 наведений зовнішній вигляд кліматичних камер JEIO TECH TH-TG та TH-ICH (Республіка Корея) [29].



Рисунок 9.17 - Кліматичні камери JEIO TECH TH-TG та TH-ICH (Республіка Корея)

Ці камери призначені для випробувань на фотостабільність до УФ-випромінення.

Основні технічні характеристики камери ТН-ІСН-300:

- внутрішні розміри камери, мм	750x650x650
- корисний об'єм, м <sup>3</sup>	0,3
- діапазон температур (з освітленням), °С	-15...+85
- діапазон відносної вологості, %	20...85
- джерело світла:	
видиме, люкс	6
УФ, Вт/м <sup>2</sup>	4,5
- час нагріву від +20 °С до +85 °С, хв.	25
- час охолодження від +20 °С до -5 °С, хв.	35
- резервуар для води (рН 6,2...7,2), л	15
- маса, кг	280
- габаритні розміри, мм	1130x985x1520
- контролер: PID контролер з РК дисплеєм	

Конструкції та основні параметри сучасних камер озону та УФ-опромінювання можна також глянути у [21], [23], [28], [29].

## 9.12 Випробування на герметичність (метод 401)

Герметичністю називають здатність оболонки (корпусу), окремих її елементів і з'єднань перешкоджати газовому або рідинного обміну між середовищами, розділеними цією оболонкою.

Випробування на герметичність проводять для визначення ступеня герметичності РЕЗ.

Вимоги до ступеня герметичності повинні бути визначені при розробці конструкції. Ступінь герметичності повинен характеризуватися потоком газу, витратою або наявністю витікання рідини, падінням тиску за одиницю часу, розміром та іншими величинами, наведеними до робочих умов за [12].

Метод випробування на герметичність вибирають в залежності від призначення РЕЗ, їх конструктивно-технологічних і компоновальних особливостей, вимог до ступеня герметичності, а також економічних характеристик випробувань.

Випробування на герметичність включають в технологічний процес виготовлення РЕЗ таким чином, щоб попередні технологічні операції не приводили до випадкового перекриття течі.

При неможливості виключити випадкові перекриття течі в технологічному процесі необхідно передбачити операції, що забезпечують звільнення течі від закупорки.

Метод або програма випробувань на герметичність вказані в стандартах, ТУ або ПВ.

Залежно від роду пробної речовини методи випробування на герметичність поділяються на дві групи: **газові і рідинні**.

**До газової групи** належать такі методи випробувань: радіоактивний, манометричний, масоспектрометричний, галогенний, бульбашковий, ультразвуковий, катодометричний, хімічний, інфрачервоний, параметричний.

**До рідинної групи** належать такі методи: гідростатичний, люмінесцентний (кольоровий), електричний, параметричний.

Реалізація зазначених методів можлива наступними способами: компресійним, камерним, вакуумним, капілярним, обмилуванням, нагріванням, зовнішнім обпресуванням, обпресуванням замкнутих оболонок в камері.

Метод повинен забезпечувати проведення випробувань в умовах, що відповідають вимогам діючої НТД з техніки безпеки і промислової санітарії.

Випробування герметичності РЕЗ проводять одним з наступних методів:

- перевірка на виявлення витoku рідини (гідростатичний метод);
- перевірка на виявлення витoku газу мас-спектрометром, в тому числі виробів, що мають вільні внутрішні об'єми, що являють собою герметичні ущільнені перегородки (мас-спектрометричний, хімічний методи);
- перевірка на проникнення рідини і газу (параметричний метод);
- перевірка на виявлення витoku газу, в тому числі шляхом виявлення витoku повітря або іншого газу з внутрішніх об'ємів РЕЗ при зануренні її в рідину зі знизеним тиском і при підвищеній температурі (бульбашковий, катодометричний метод);
- перевірка на виявлення витoku повітря, що подається на виріб під тиском (манометричний метод);
- перевірка шляхом проникнення парів вологи (вологісний метод).

Підготовка РЕЗ до випробувань на герметичність передбачає усунення наслідків випадкового перекриття течі після зберігання, транспортування та попередніх операцій і випробувань.

Для випробувань на герметичність необхідно використовувати обладнання, укомплектоване спеціальними пристосуваннями, установочними деталями і каліброваними течами відповідно до ТУ.

**Випробування на герметичність РЕЗ вакуумним способом бульбашкового методу проводять наступним чином.**

Виріб занурюють у ванну з індикаторної рідиною, що знаходиться всередині барокамери, яка повинна забезпечувати випробувальний режим. Кількість рідини в ванні має бути достатньою, щоб досліджувана поверхня була занурена повністю. Температура випробувальної рідини 15...35°C, кінематична в'язкість 25 мСт при 20°C. Тиск в камері знижують до 0,1...1 кПа.

Вважається, що вироби витримали випробування, якщо бульбашки газу не виділяються.

**Випробування на герметичність РЕМ камерним способом манометричного методу проводять наступним чином.**

Виріб (або партію виробів) поміщають в камеру, заповнюють її пробним газом під тиском і витримують протягом певного часу, встановленого в стандартах, ТУ і ПВ. Після цього тиск у камері знижують до 0,1 кПа, заповнюють камеру гелієм і витримують протягом 30 хв. при цьому тиску.

Вироби витягують з камери і витримують протягом 20 хв. за умов, що забезпечують видалення гелію, адсорбованого зовнішніми поверхнями.

Потім вироби поміщають в камеру, з'єднану з мас-спектрометром і вимірюють швидкість витоку гелію. Вимірне значення порівнюють із значенням швидкості витоку гелію, зазначеної в стандартах і ТУ або ПВ на виріб.

Вважається, що вироби витримали випробування, якщо швидкість витоку гелію менше або дорівнює значенню, зазначеному в стандартах, ТУ або ПВ на виріб.

## 10 ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ТА ПРИНЦИПИ ДІЇ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КЛІМАТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ

### 10.1 Обладнання для випробувань на температурні впливи

#### 10.1.1 Засоби вимірювання температури

Основою пристроїв для вимірювання температури є датчики температури.

У їх якості у випробувальній техніці застосовують термоперетворювачі опору, термоелектричні перетворювачі, рідинні термометри, дилатометри і пірометри.

Найбільш широке застосування отримали *термоперетворювачі опору* і *термоелектричні перетворювачі*. Їх випускають в різних виконаннях в залежності від способу контакту з навколишнім середовищем (занурювані, поверхневі), умов експлуатації (стаціонарні, переносні), захищеності від впливу навколишнього середовища (звичайні, пилозахищені, водозахищені, вибухозахищені), герметичності, інерційності, стійкості до механічних впливів (звичайні, вібростійкі). Вони розрізняються також за кількістю чутливих елементів для вимірювання температури в одній зоні (одинарні, подвійні), кількості зон (одно- і багатозонні) і вивідних провідників (два, три, чотири).

##### 10.1.1.1 Термоперетворювачі опору

Принцип дії *термоперетворювачів опору* заснований на використанні властивості чутливого елемента міняти свій опір при зміні температури. Вони можуть бути дротяними і напівпровідниковими.

Матеріалом дротяних термоперетворювачів є, як правило, мідь або платина. Чутливий елемент більшості з них являє собою спіраль, намотану без механічних натягів на каркас з ізоляційного матеріалу. Каркас зі спіраллю поміщений в захисний кожух, який являє собою металеву або скляну гільзу, заповнену гелієм або порошком окису алюмінію.

Важливим параметром термоперетворювача є *показник теплової інерції* або *постійна часу*, що визначається як час, протягом якого тіло, поміщене в середу з постійною температурою, нагрівається до 63,2% значення температури середовища. За цим параметром термоперетворювачі опору випускають з малою тепловою інерцією (не більше 10 с), із середньою (не більше 60 с) і з великою (понад 60 с), що визначається їх конструкцією.

*За точністю вимірювання* температури термоперетворювачі опору ділять на п'ять класів.

До переваг термоперетворювачів опору можна віднести великий внутрішній опір, малі габарити, високу механічну міцність.

### 10.1.1.2 Термоелектричні перетворювачі

Чутливим елементом *термоелектричного перетворювача* є термопара, що представляє собою два різнорідних електрода, з'єднаних в одній точці (робочий кінець термопари). При нерівності температур робочого і вільних кінців термопари на останніх виникає сигнал (термоЕРС), пропорційний різниці температур робочого і вільних кінців.

Термоелектричні перетворювачі працюють в широкому інтервалі температур. Низькі температури (до  $-200^{\circ}\text{C}$ ) вимірюють за допомогою мідно-копелевих, хромель-копелевих, хромель-алюмелевих, залізо-константанових і мідно-константанових термоперетворювачів, з яких останні отримали найбільше застосування.

Для вимірювання більш низьких температур термоелектричні перетворювачі застосовують рідко внаслідок їх низької чутливості, а також значних похибок, обумовлених паразитними ЕРС.

Перетворювачі типу ТВР використовують в вакуумі або в інертних середовищах, оскільки при високих температурах на повітрі вони окислюються.

Термоелектричний перетворювач як елемент системи регулювання в значній мірі визначає характеристики температурного пристрою випробувального обладнання. Теплова інерція термоперетворювача залежить від його конструктивного виконання, рівня температури і діаметра термоелектродів.

Випускають термоелектричні перетворювачі малої, середньої, великої та ненормованої інерційності з показником теплової інерції

відповідно не більше 5, 60, 180 і понад 180 с для тих, що занурюються і не більше 10, 120, 300 і понад 300 с для поверхневих.

Враховуючи високі метрологічні вимоги, що пред'являються до температурного пристрою випробувального обладнання, застосовують термоперетворювачі без чохла, що істотно знижує їх теплову інерцію.

### 10.1.1.3 Рідинні термометри

*Рідинні термометри* застосовують для контролю температури. За своїм призначенням термометри ділять на лабораторні, технічні, медичні, метеорологічні та ін.

Усі термометри розраховані або на часткове занурення в вимірювану середу (неповне занурення), або на занурення до зчитуваної температури (повне занурення).

В випробувальній техніці в основному застосовують лабораторні термометри, а також деякі модифікації технічних.

Найчастіше у випробувальних пристроях застосовують ртутний електроконтактний термометр, в капілярі якого за допомогою магнітної головки по гвинту переміщується рухливий робочий контакт.

Необхідна температура задається за допомогою переміщення рухомого контакту по шкалі термометра на потрібний рівень. Після досягнення заданої температури термометр (ртуть) замикає електричний ланцюг регулятора температури, останній робить необхідні комутації енергетичних агрегатів.

Таким чином, ртутні електроконтактні термометри можуть служити датчиками системи регулювання.

За конструкцією електроконтактні термометри ділять на два типи: ТЗК - з заданим постійним робочим контактом, та ТПК - з рухомим робочим контактом, по виконанню - на прямі (П) і кутові (У).

У випробувальній техніці в основному застосовують термометри типу ТПК, що дають можливість стабілізувати тепловий режим на будь-якому температурному рівні в межах шкали термометра. Мінімальна температура контактування термометрів  $-30^{\circ}\text{C}$ , максимальна  $300^{\circ}\text{C}$ .

Допустима похибка термометрів ТПК і похибка установки точки контактування не перевищують ціни ділення шкали.

### 10.1.1.4 Дилатометри

*Дилатометр* відноситься до механічних датчиків і являє собою пристрій, принцип дії якого заснований на зміні розміру тіл при підвищенні або зниженні температури.

На рис. 10.1 показаний дилатометричний датчик машини для випробування на повзучість і тривалу міцність.

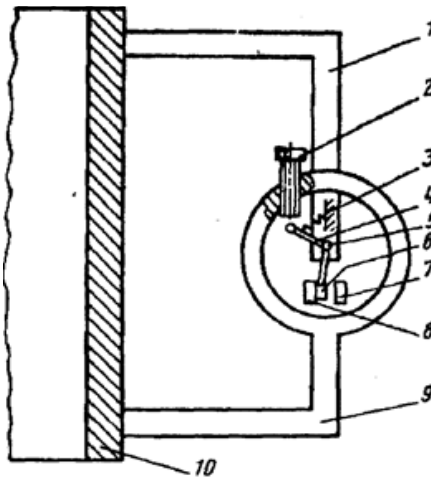


Рисунок 10.1 - Схема дилатометричного датчика

Датчик складається з двох тяг: 1 і 9, жорстко з'єднаних з кінцями жаротривкої труби 10, лінійні розміри якої залежать від температури в робочому просторі високотемпературного пристрою. На кінці тяги 1 закріплена вісь 5, навколо якої обертається важіль 4. На важелі закріплений рухомий контакт 6, а на тязі 1 - нерухомі контакти 7 і 8.

Система налаштовується на заданий температурний рівень за допомогою регульовального гвинта 2. При збільшенні температури до заданого рівня труба 10 розширюється, нижній кінець гвинта 2 переміщується вниз і впливає на головку важеля 4, останній повертається навколо осі 5 і замикає рухливий контакт 6 з контактом 7. При зменшенні температури відносно заданого рівня під впливом

пружини 3 важіль повертається в початковий стан, при цьому замикаються контакти 6 і 8.

Таким чином, дилатометричний датчик має два вихідних стану, тобто заздалегідь обумовлює позиційний характер регулювання, що є основним його недоліком. До інших недоліків відносяться невисока чутливість і велика постійна часу.

### 10.1.1.5 Пірометри

Принцип дії *пірометрів* заснований на вимірюванні сумарної енергії або складу випромінювання нагрітих тіл. Вони дозволяють вимірювати температуру в широких межах, дистанційно.

Залежно від принципу дії їх поділяють на пірометри сумарного випромінювання (*радіаційні*), оптичні пірометри (*пірометри яскравості*), *фотоелектричні* і *колірні* пірометри.

Принцип дії *радіаційного пірометра* заснований на вимірюванні інтегральної енергії випромінювання, пропорційної 4-му ступеню температури тіла.

Основою радіаційного пірометра є телескоп, що складається з теплоприймача і оптичної системи, яка концентрує на теплоприймач сумарний променистий потік тіла, температура якого підлягає вимірюванню. Теплоприймачем зазвичай служать кілька термопар, з'єднаних послідовно у термобатарей.

Градуювання радіаційних пірометрів відбувається за абсолютно чорним тілом з коефіцієнтом випромінювання (чорноти)  $\varepsilon = 1$ . При вимірюванні температури реальних фізичних тіл  $\varepsilon < 1$ , тому пірометр показує радіаційну температуру  $T_p$  меншу, ніж справжня температура тіла  $T$ , і її перераховують за формулою:

$$T = T_p \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}$$

*Оптичні пірометри* вимірюють температуру за монохроматичною яскравістю тіла у видимій області спектра.

Їх, як і радіаційні, градуують за випромінюванням абсолютно чорного тіла, тому при вимірюванні температур реальних тіл з монохроматичним коефіцієнтом випромінювання  $\varepsilon < 1$  вони показують нижчу в порівнянні з дійсною, так звану яскравісну

монохроматичну температуру  $T_{\lambda}$ . Дійсна температура  $T$  з урахуванням поправки на неповноту випромінювання може бути визначена за формулою:

$$T = \left( \frac{1}{T_{\lambda}} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon} \right)^{-1}$$

де:  $C_2$  - постійна Планка;  
 $\lambda$  - довжина хвилі.

Монохроматичну яскравість нагрітого тіла визначають, порівнюючи його яскравість з яскравістю нитки еталонної лампи, температура якої відома.

Порівняння здійснюють двома способами: зміною електричного струму у нитці еталонної лампи до тих пір, поки її яскравість не зрівняється з яскравістю зображення тіла і нитка зникне на його тлі, або зміною яскравості зображення нагрітого тіла оптичним клином доти, поки він не зрівняється з яскравістю нитки еталонної лампи при постійному струмі в ній.

Чутливим елементом, що визначає збіг яскравостей еталонної нитки і нагрітого тіла, служать зазвичай очі людини, що виключає можливість проводити автоматичний запис температури і використовувати пірометр в системах автоматичного регулювання.

У *фотоелектричних пірометрах* порівняння яскравостей тіла і нитки лампи здійснюють фотоелементом.

У вітчизняному пірометрі часткового випромінювання ФЕП-4 застосовують вакуумні сурм'яно-цезієві фотоелементи зі спектральною характеристикою, аналогічною характеристиці очі.

Принцип дії пірометра заснований на періодичному (50 Гц) і почерговому освітленні фотоелемента нагрітим тілом, температура якого підлягає вимірюванню, і лампою. Обидва світлові потоки змінюються у протифазі. При їх нерівності в ланцюзі фотоелемента виникає змінна складова фотоструму, яка після посилення впливає на живлення лампи. Струм розжарення лампи змінюється доти, поки освітленості від вимірюваного тіла і лампи не зрівняються і змінна складова фотоструму не стане рівною нулю. Таким чином, сила струму в лампі однозначно пов'язана з температурою вимірюваного

тіла. Вихідний сигнал пірометра знімають з опору, включеного в ланцюг живлення лампи.

У *колірних пірометрах* інтенсивність монохроматичного випромінювання тіла вимірюють при будь-якої температурі для двох ділянок довжин хвиль, наприклад, для червоної і синьо-зеленої ділянки видимої частини спектра. Відношення цих інтенсивностей залежить від температури. Це впливає з закону Вина, згідно з яким максимум інтенсивності випромінювання зі збільшенням температури зміщується в область більш коротких довжин хвиль. Отже, вимірявши дві яскраві температури тіла для різних монохроматичних випромінювань з довжинами хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , можна по відношенню цих температур знайти так звану колірну температуру тіла  $T_k$ .

Істинну температуру тіла визначають з виразу:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_k} - \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2(\lambda_1 - \lambda_2)} \ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}$$

Пірометри мають переваги перед контактними перетворювачами в наступних випадках:

- в температурних діапазонах і середовищах, де не може бути забезпечена довготривала стабільність контактних перетворювачів;
- при необхідності забезпечення високої швидкодії;
- якщо контакт термоелектричного перетворювача з об'єктом вимірювання важко або взагалі неможливо встановити; якщо контакт термоелектричного перетворювача з об'єктом вимірювання неприпустимий зважаючи спотворення їм температурного поля.

Істотним недоліком пірометрів є залежність істинної температури тіла від коефіцієнта випромінювання, точна оцінка якого в більшості випадків є важкою. Найбільш надійні значення істинної температури можуть бути отримані в умовах, коли значення  $\varepsilon$  наближається до одиниці.

### **10.1.2 Вимоги до камер для випробувань на температурні впливи**

Для проведення випробувань на температурні впливи застосовують камери тепла, холоду або комбіновані камери: термовологокамери, термобарокамери, камери тепла і холоду, камери термоциклування.

Під час установки виробів в камери кліматичних випробувань необхідно 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.

Вимоги до об'єму камер в залежності від розмірів випробовуваної апаратури і значення теплорозсіювання з одиниці її поверхні встановлюють 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  $\epsilon$  не менш 0,8.

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 або пристосуваннях (касетях, що контактують з пристроями). Металеві частини пристосувань обов'язково повинні мати антикорозійне покриття.

У випробувальних камерах необхідний тепловий режим і рівномірність температури за об'ємом камери забезпечується розміщенням нагрівальних елементів на дні, в стінках і двері камери або подачею нагрітого повітря (теплоносія) всередину металевої сорочки, що оточує корисний об'єм.

Отримання низьких температур може досягатися двома способами: безпосереднім охолодженням за допомогою охолоджуючого агента (рідкого азоту, двоокису вуглецю, аміаку), а також непрямим охолодженням за допомогою компресорної установки.

Непрямий спосіб охолодження заснований на властивості рідини при випаровуванні поглинати тепло з навколишнього середовища. Технічна реалізація даного способу заснована на

застосуванні компресійної випарувальної системи, в одній частині якої газоподібний холодоагент (фреон) стискається до тиску, що забезпечує конденсацію, а в іншій частині - швидко розширюється. Охолоджуючий агент в установці використовується тривалий час, оскільки він циркулює в замкнутій системі.

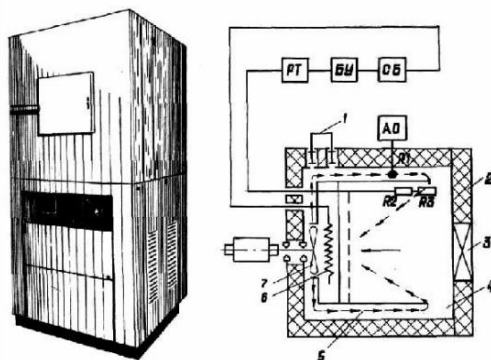
Температурний режим в випробувальних камерах підтримується автоматично включенням або відключенням частини нагрівальних елементів або холодильної установки.

Для вимірювання та автоматичного регулювання температури застосовують контактні ртутні термометри, електронні мости, потенціометри, програмні пристрої, при цьому термочутливими датчиками є термопари або терморезистори.

Розміщення датчиків контролю температури при випробуванні виробів, що розсіюють тепло, повинно враховувати можливість виключення взаємовпливу виробів один на одного з тим, щоб при встановленні температурного режиму вихідні вимірювальні прилади показували справжню температуру.

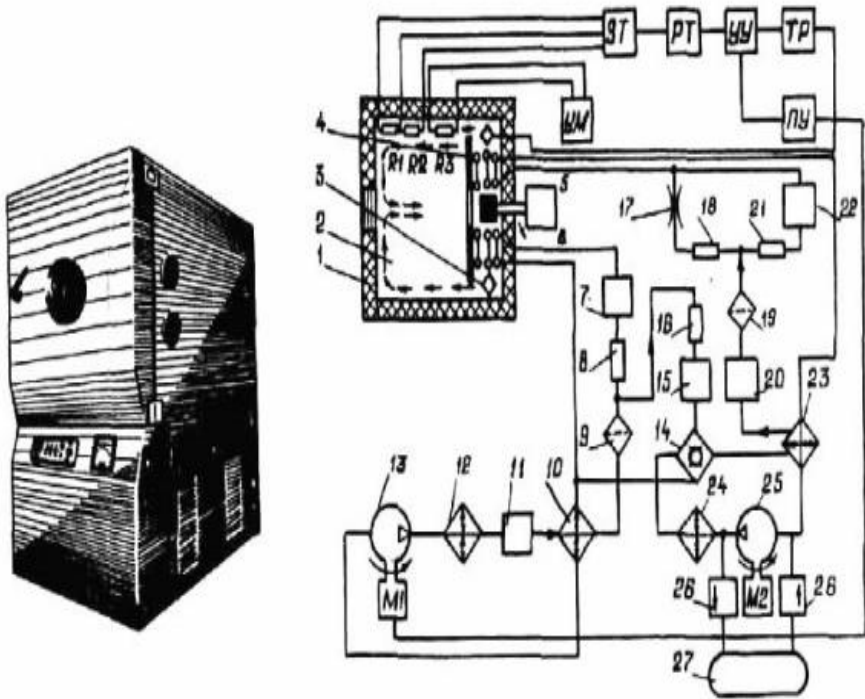
### 10.1.3 Принципи дії та конструкції камер для випробувань на температурні впливи

Зовнішній вигляд камер і їх схематичне зображення, яке пояснює принцип роботи, показані на рис. 10.2, 10.3, 10.4.



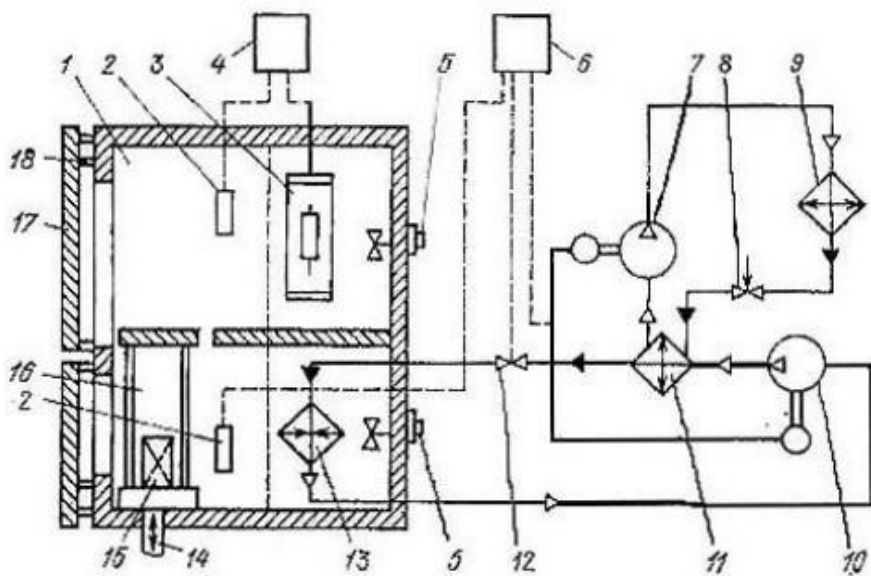
1 - засувка; 2 - двері; 3 - вікно; 4 - корисний об'єм; 5 - повітряпровід;  
6 - нагрівач; 7 - вентилятор; РТ - регулятор температури; БУ - блок керування; СБ - силовий блок; АО - блок аварійного відключення

Рисунок 10.2 - Камера тепла КТ-0,05-315М



1 - двері; 2 - корисний об'єм; 3 - нагрівач; 4, 6 - випарювачі; 5 - вентилятор; 7 - терморегулюючий вентиль; 8 - соленоїдний клапан; 9, 20 - фільтри; 10, 14, 26 - теплообмінники; 11, 23 - вентилі; 12 - конденсатор теплотехнічний; 13, 22 - компресори; 15 - конденсатор-випарювач; 16, 25 - термовентилі; 17, 19, 21, 24 - соленоїдні вентилі; 18 - дюза; 27 - ємність; ЗТ - задатчик температури; РТ - регулятор температури; УУ - пристрій керування; ТР - тиристорний регулятор; ПУ - пусковий пристрій; УМ - врівноважуючий міст

Рисунок 10.3 - Камера тепла і холоду КТХ-0,4-65/155



1 - камера тепла; 2 - датчики температури; 3 - електронагрівач; 4 - регулятор температури камери тепла; 5 - осьовий вентилятор; 6 - регулятор температури камери холоду; 7, 10 - компресори верхнього ступеню холодильного агрегату; 8 - регулюючий вентиль; 9 - компресор нижнього ступеню холодильного агрегату; 11 - теплообмінник; 12 - регулюючий вентиль; 13 - випарник холодильного агрегату; 14 - пристрій переміщення виробу з камери в камеру; 15 - виріб; 16 - камера холоду; 17 - двері; 18 - ущільнення

Рисунок 10.4 - Схема обладнання для випробувань на циклічний вплив температур

Конструкції та основні параметри сучасних термокамер та систем для температурних випробувань і термоцикування можна глянути також у [21], [28], [29].

## 10.2 Обладнання для випробувань на підвищену вологість

### 10.2.1 Засоби вимірювання вологості

Існує декілька способів вимірювання і дистанційного контролю вологості повітря.

10.2.1.1 *Психрометричний метод*, заснований на вимірюванні температур двома термометрами - сухим і вологим.

Вологий термометр знаходиться в термодинамічній рівновазі з навколишнім середовищем. Випаровування з поверхні вологого термометра відбувається тим інтенсивніше, чим нижче вологість навколишнього повітря. Різниця показань термометрів залежить від значення вологості повітря та наведена у табл. 10.1.

Таблиця 10.1 - Залежність різниці показань термометрів від значення вологості повітря

Показання сухого термометра, °C	Різниця показань сухого та вологого термометрів, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Відносна вологість, %										
10	100	88	76	65	51	44	34	24	14	4	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90-	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	34	30	24
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Конструкція найпростішого психрометра наведена на рис. 10.5.

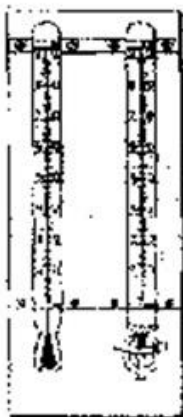


Рисунок 10.5 - Конструкція психрометра

Психрометричний метод заснований на залежності між пружністю водяного пара  $e$  (у ГПа) та показниками сухого  $t_c$  та вологого  $t_v$  термометрів.

Точність цього метода визначається головним чином похибками вимірювання температур  $t_c$  та  $t_v$ . Для збільшення точності вимірювань у електричних психрометрах застосовуються пристрої для аспірації повітря з постійною швидкістю не менш 3-4 м/с.

До переваг психрометричного метода можна віднести досить високу точність при додатних температурах и не дуже велику інерційність.

10.2.1.2 **Метод точки роси**, який полягає у визначенні температури, до якої треба охолоджувати ненасичене повітря, щоб довести його до стану насиченості.

Він заснований на залежності:

$$\varphi = \frac{100E_r}{E_t}$$

де:  $E_r$  - пружність насиченого пару при температурі точки роси;

$E_t$  - пружність насиченого пару при температурі  $t$ .

При незмінному тиску точка роси не залежить від температури повітря.

Похибка визначення відносної вологості методом точки роси прямо пропорційна відносній вологості та похибці вимірювання температури й зворотно пропорційна квадрату абсолютної температури точки роси.

**10.2.1.3 Сорбційний метод**, при якому вологість визначають за зміною електропровідності плівки, на яку нанесений поглинувач вологи - сорбент.

Цей метод заснований на використанні гігроскопічних тіл, властивості яких змінюються в залежності від кількості поглиненої вологи. Залежно від властивостей матеріалу, використаного для вимірювання, розрізняють деформаційні, вагові, колірні і інші сорбційні гігрометри.

Існує декілька різновидів сорбційного методу.

**Сорбційно-деформаційний метод** - про вологість судять за вигином двошарової структури, один з шарів якої змінює свій об'єм при поглинанні вологи, або за зміною довжини волокна чи плівки гігроскопічного матеріалу. Метод дозволяє виміряти велику відносну вологість майже до 100% з низькою точністю порядку  $\pm 5\%$ .

**Сорбційно-кулонометричний метод** - вологість визначають за кількістю електрики, що витрачається на електроліз вологи, поглиненої плівкою частково гідратованого п'ятиокису фосфору. Застосовується для вимірювання вологості в дуже широкому діапазоні абсолютної вологості.

**Сорбційно-ваговий метод** - визначається маса вологи  $m$ , що міститься у відомому об'ємі  $V$ . Відношення  $m/V$  дає абсолютну вологість. Метод застосовують в лабораторних умовах.

**Сорбційно-термічний метод** - вимірюється кількість тепла, що виділяється при поглинанні вологи гігроскопічним матеріалом. Застосовується рідко через високу складність вимірювання тепла.

**Дифузійний метод** - заснований на дифузії газів через пористу перегородку. Значення вологості визначають за різницею тисків зовнішнього середовища і газу в вимірювальній камері.

**Об'ємний, п'єзометричний метод** - визначення зміни тиску взятої проби газу при поглинанні водяної пари сорбентом або виморожуванням. Метод застосовується в лабораторних умовах.

10.2.1.4 Визначення вологості повітря з *допомогою гігрометрів*, принцип дії яких заснований на залежності механічних властивостей деяких матеріалів від вологості оточуючого середовища.

У системах автоматичного регулювання температури і вологості у якості датчиків найбільш часто використовуються ртутні контактні термометри, терморезистори, термопари і деформаційні гігрометри.

### **10.2.2 Принципи дії та конструкції камер для випробувань на вплив вологості**

Для випробування РЕЗ і їх елементів на вплив підвищеної вологості використовують камери вологості або комбіновані термовологокамери. Камери повинні забезпечувати отримання повітря з певною температурою, вологістю і швидкістю руху. При цьому повинен відтворюватися постійний або циклічний режим випробувань.

Випробувальна камера, як правило, складається з робочого відсіку, в якому розміщують вироби, осушувально-зволожувальні пристрої, вентилятори, вимірювачі вологості, допоміжні пристрої і електрообладнання.

Для отримання в камері заданого режиму необхідно досить точно регулювати вміст вологи та температуру повітря, оскільки незначні зміни температури супроводжуються значними коливаннями відносної вологості поблизу точки роси.

Для підтримки відносної вологості  $95 \pm 3\%$  в діапазоні температур  $40 \dots 70$  °С потрібна точність регулювання за сухим термометром  $\pm 0,3$ °С, а за вологим до  $\pm 0,2$ °С.

Необхідна вологість повітря в випробувальних камерах може бути досягнута наступними способами:

- відкритий: повітря стикається з відкритою водною поверхнею;
- закритий: вологість досягається шляхом циркуляції повітря через закритий зволожувальний пристрій.

Схеми, що ілюструють ці способи, наведені на рис. 10.6.

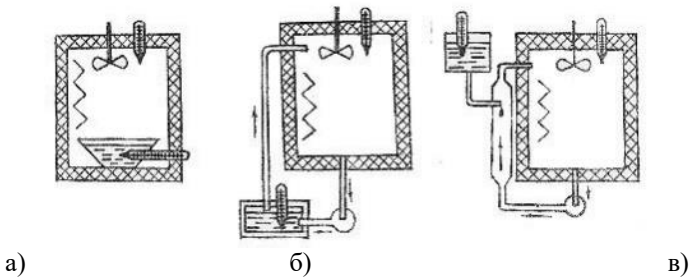
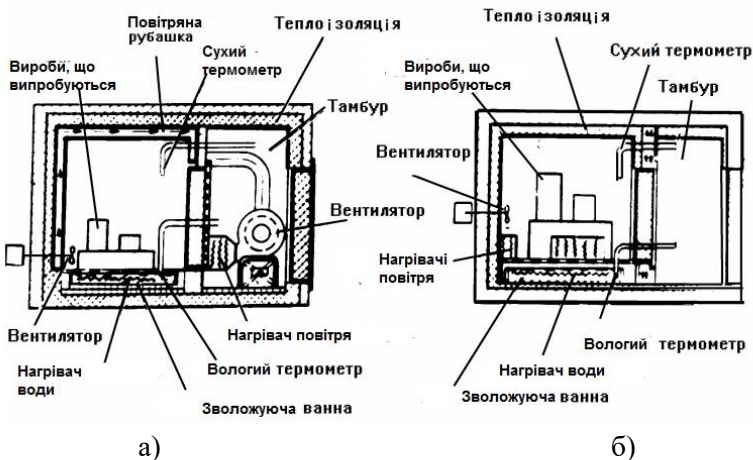


Рисунок 10.6 - Способи зволоження повітря

Найпростішим є *відкритий спосіб* (рис. 10.6 а), що відтворює природні умови зволоження. Він досить простий, але його практичне застосування обмежується необхідністю строго підтримувати різницю температур повітря і води, а також точності регулювання температури в межах психрометричної різниці. Зниження температури більш ніж на 0,5°С при високій відносній вологості та підвищеній температурі може призвести до випадання роси, що є недоліком способу.

На рис. 10.7 наведені схеми будови камер кімнатного типу зі зволоженням повітря відкритим способом.



а - з теплопередачею через стінки; б - з нагрівачами у камері

Рисунок 10.7 - Схеми будови камер кімнатного типу зі зволоженням повітря відкритим способом

Характерною особливістю *закритих способів* зволоження є рециркуляція повітря з робочого об'єму камери через зволожувальний пристрій (зволожувач). В зволожувачі повітря або продувається (барботується) через шар підігрітої води (рис. 10.6 б), або змішується з розпорошеною водою (рис. 10.6 в).

Закритий спосіб дозволяє регулювати вміст вологи і температуру атмосфери камери за рахунок зміни кількості циркулюючого повітря в замкнутому циклі і ступеня його підігріву.

На рис. 10.8 наведена схема будови камери Кюльавтома для зволоження повітря закритим способом.

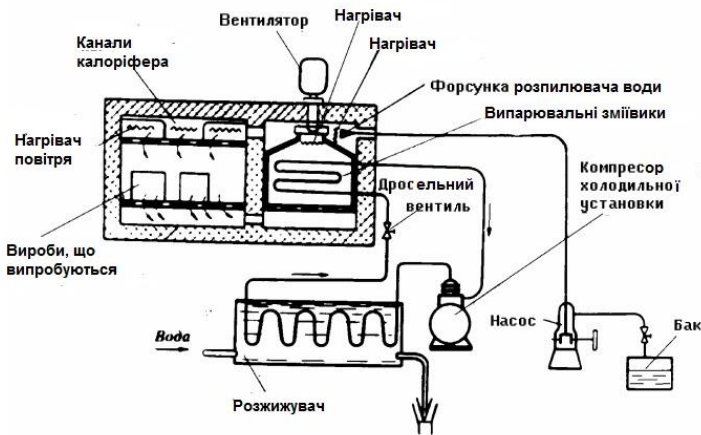


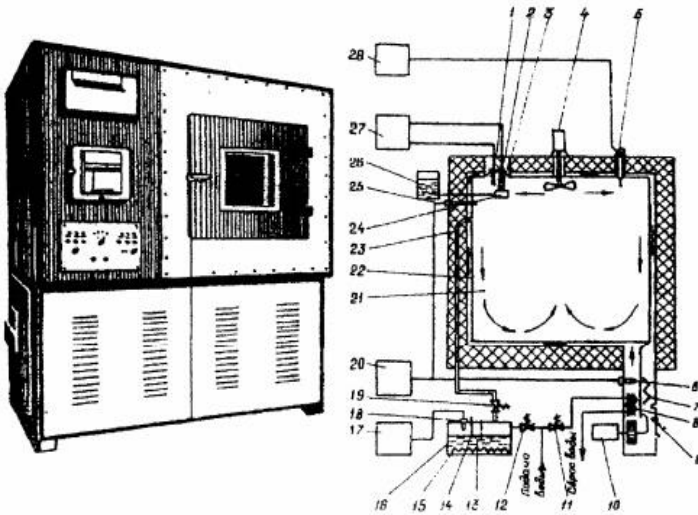
Рисунок 10.8 - Схема будови камери Кюльавтома для зволоження повітря закритим способом

Іноді для імітації швидких добових змін температури і вологості повітря в випробувальний об'єм вводиться водяна пара.

Керування, сигналізація і контроль режиму випробування виконуються вручну або автоматично.

Автоматична підтримка режиму роботи термовологокамери заснована на спільній дії датчиків температури і вологості з програмними пристроями та виконавчими механізмами.

Зовнішній вигляд і схема камери тепла і вологи КВТ-0,4-155 наведені на рис. 10.9.



1 - сухой термометр; 2 - вологий термометр; 3 - чохол; 4,10 - вентилятори; 5,6,18,25 - платинові термометри опору; 7,15 - нагрівачі; 8 - змійовик; 9 - заслінка; 11,12,19 - соленоїдні вентиля; 13,14 - датчики рівня води, 16 - паровий зволожувач; 17,20,27,28 - електронні мости; 21 - корисний об'єм камери; 22 - простір для циркуляції повітря; 23 - паровідвід; 24 - стакан підживлення; 26 - ємність з дистильованою водою

Рисунок 10.9 - Зовнішній вигляд і схема камери тепла і вологи КВТ-0,4-155

Конструкції та основні параметри сучасних камер тепла та вологи можна глянути також у [21], [28], [29].

## 11 ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА БІОЛОГІЧНІ ВПЛИВИ

### 11.1 Вплив біологічних факторів на РЕЗ

До складу сучасних РЕЗ входять значною мірою різноманітні мікроелектронні пристрої; а найближчим часом планується проектувати вироби з використанням нанотехнологій. Практика показує, що на мікро- й нанорівнях 50...80% ушкоджень викликано біологічними впливами, які суттєво впливають на чутливі елементи приладів і електронних засобів.

**Біологічні зовнішні збуджуючі фактори** - організми або їх сполучення, які впливають на роботу РЕЗ і викликають погіршення справності і працездатності стану виробів.

Збуджуючими факторами можуть бути бактерії, цвілеві гриби, водорості, тварини (риби, черви, земноводні, плазуни і ссавці). В даний час регламентується урахування таких біофакторів: цвілевих грибів, комах, гризунів і ґрунтових мікроорганізмів.

**Біологічним ушкодженням** називають подію, що полягає у виході будь-якого параметра виробу під дією біофактора за межі, зазначені в НТД.

Види біологічних ушкоджень:

- механічне руйнування при контакті організмів з виробом;
- погіршення експлуатаційних параметрів;
- біохімічне руйнування;
- біокорозія.

**Механічне руйнування** викликається в основному макроорганізмами. Руйнування при контакті може відбутися в результаті зіткнення (наприклад, зіткнення птахів з літаками й антенами радіолокаційних станцій), ушкодження матеріалів пацюками, мишами, знищення виробів термітами і мурахами.

**Погіршення експлуатаційних параметрів** викликається біозабрудненням, біозасміченням і біообростанням. Біозабруднення викликано продуктами життєдіяльності організмів. Біозасмічення пов'язане з наявністю спор грибів і бактерій, насіння рослин, частин міцелію грибів, посліду птахів, виділень організмів, відмерлих організмів тощо. Обростання бактеріями, грибами, водоростями, губками, моллюсками та іншими організмами поверхонь виробів підсилює корозію металів.

**Біохімічне руйнування** викликається мікроорганізмами. Цей вид руйнувань розділяють на два підвиди:

- біологічне споживання матеріалів у процесі живлення мікроорганізмів;
- хімічний вплив речовин, що виділяються при цьому.

**Біокорозія** - фізико-хімічна корозія на границі матеріал-організм, викликана впливом аміно- і органічних кислот, а також продуктів гідролізу (електрохімічний процес корозії металів).

На надійність і працездатність виробів найбільшою мірою впливають бактерії та цвілеві гриби. Оптимальними умовами розвитку цвілевих грибків є відносна вологість повітря більше 85%, температура +20...+30°C і застій повітря. Найбільші руйнування пластмас, дерева, гуми й шкіри виникають під дією цвілі. Цвіль утворює на поверхні матеріалу водну плівку, що сприяє його хімічному розкладанню й втраті найважливіших властивостей.

Всередині закритих або напіввідчинених виробів часто створюють спеціальний мікроклімат. У багатьох випадках це сприяє ураженню виробів цвілевими грибами.

Іншим видом біологічного впливу є комахи, особливо терміти.

Певну небезпеку для виробів, особливо кабелів і дротів, можуть являти гризуни - пацюки й миші. Вони можуть ушкоджувати ізоляційні матеріали, кабелі, дроти й несучі конструкції, в результаті чого електротехнічні й радіоелектронні вироби можуть виходити з ладу.

Захист від біологічних факторів впливу здійснюють хімічними методами: для захисту від цвілевих грибків і комах використовують хімічні отрути й спеціальні покриття. Однак найбільш ефективними є конструктивні заходи зі створення внутрішнього клімату виробів, надійних захисних оболонок, заміни матеріалів тощо.

Випробування на біостійкість проводять з метою визначення здатності РЕЗ зберігати в умовах впливу біологічних факторів значення показників в межах, встановлених в НТД.

## 11.2 Випробування на вплив цвілевих грибів (метод 214)

Найбільші руйнування РЕЗ виникають під дією грибової цвілі.

Грибову цвіль відносять до нижчих рослин, які не мають фотосинтезу. Вони виділяють лимонну, оцтову, щавлеву кислоти та інші хімічні речовини, під дією яких погіршуються електроізоляційні властивості полімерних матеріалів. Захист від них є обов'язковим для апаратури тропічної зони.

Грибостійкістю називають здатність РЕЗ протистояти розвитку і руйнівній дії грибової цвілі в середовищі.

Випробування проводять для визначення здатності виробів або їх окремих блоків і складальних одиниць протистояти розвитку грибової цвілі.

Суть методу випробувань на стійкість до дії цвілевих грибів полягає в утриманні виробів, заражених спорами цвілевих грибів, в умовах, оптимальних для їх розвитку, з подальшою оцінкою грибостійкості.

Випробування на грибостійкість проводять на зразках, які не піддавалися кліматичним і механічним випробуванням. Кількість зразків встановлюють відповідно до НТД і ПВ.

Випробування проводять наступним способом.

Перед випробуванням поверхню зразків (виробів, деталей) ретельно протирають (промивають) спиртом-ректифікатом. Для протирання використовують бязь або марлю. Роботу проводять в гумових рукавичках. Потім зразки висушують, після чого витримують в НКУ. При цьому повинні бути вжиті заходи, що виключають можливість зараження зразків.

Зразки поміщають в камеру грибоутворення або в ексікатори. Антисептовані зразки (в тому числі і вироби, що містять окремі антисептуючі деталі) випробують окремо від неантисептованих.

Разом із зразками ставлять контрольну чашку Петрі з живильним середовищем для контролю життєздатності спор грибів.

Зразки, а також контрольну чашку Петрі з живильним середовищем обприскують водною суспензією спір грибів зі скляного пульверизатора з діаметром вхідного отвору не менше 1 мм.

Випробування проводять при температурі  $29 \pm 2^\circ\text{C}$  і відносній вологості  $95 \pm 3\%$  при відсутності циркуляції повітря (допускається

короткочасне перемішування повітря), при цьому зразки повинні бути захищені від дії штучного і природного світла.

Через 48 год. проводять огляд контрольних чашок Петрі.

Поширення і розмноження цвілі здійснюється спорами, розмір яких не перевищує 10 мкм. Якщо на чашках не спостерігається зростання грибів з числа видів, використаних для зараження, то слід провести вторинне обприскування виробів життєздатною суспензією спір грибів.

Термін випробувань в цьому випадку слід відраховувати з часу вторинного обприскування. Тривалість випробувань 30 діб.

Після випробування зразки виймають з камери і піддають візуальному огляду.

Вважають, що зразки витримали випробування, якщо зростання цвілі практично не видно неозброєним оком (при 56-кратному збільшенні може спостерігатися слабке зростання міцелію і одиничне спороношення).

Ступінь біологічного обростання зразків оцінюють за 5-бальною системою:

0 - росту грибів немає; на зразках при контролі під мікроскопом при 56-кратному збільшенні не виявляється зростання грибів;

1 - зростання грибів дуже слабке; на зразках при контролі під мікроскопом при 56-кратному збільшенні спостерігаються поодинокі пророслі спори;

2 - зростання грибів слабке; на зразках при контролі під мікроскопом при 56-кратному збільшенні спостерігається слабке зростання міцелію і одиничне спороношення;

3 - зростання грибів помірне; на зразках неозброєним оком видно осередки цвілі;

4 - рясний ріст грибів; неозброєним оком видно суцільне ураження грибами поверхні зразків.

Після закінчення випробувань зразки повинні бути продезінфіковані або знищені.

Допустимі показники грибостійкості виробів в залежності від виконуваних ними функцій наведені в ГОСТ 9.048-75.

Зовнішній вигляд камери грибоутворення наведений на рис.

11.1.



Рисунок 11.1 - Камера грибоутворення

Камера призначена для випробувань виробів електронної техніки, матеріалів, машин, приладів та інших технічних виробів на стійкість (стійкість і міцність) до впливу підвищеної вологості повітря і цвілевих грибів при експлуатації, транспортуванні та зберіганні відповідно до вимог стандартів.

Основні технічні характеристики:

- внутрішній об'єм камери, м <sup>3</sup>	1,0
- габаритні розміри робочого об'єму, мм	900x1300x900
- навантаження на підлогу, кг	до 500
- діапазон температур, °C	+5...+100
- діапазон значень відносної вологості, %	70...98

Конструкції та основні параметри сучасних камер грибоутворення можна глянути також у [29].

### **11.3 Випробування на стійкість матеріалів до дії комах**

**Випробування на стійкість матеріалів до дії термітів** в лабораторних умовах проводять в термостатах при температурі  $26\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , підтримуючи вологість повітря близькою до 100%.

На зразки матеріалів, що мають форму пластин розміром 40 x 80 мм, накладають смужку фільтрувального паперу так, щоб вона закривала половину поверхні зразка. Змочений водою папір є джерелом харчування і вологи.

Потім на кожен зразок встановлюють по два скляних садки і притискають їх пружинами або гумовими кільцями до зразків.

У кожен садок поміщають по 50 термітів. Для спостереження життєздатності термітів готують контрольні садки.

Після цього садки зі зразками і контрольні садки встановлюють в термостати.

Тривалість випробувань 30 діб.

Три рази в тиждень візуально враховують ступінь пошкодження термітами зразків (отвори, подряпини, розпушення і т.ін.) і замінюють загиблих термітів рівним числом життєздатних.

У природних умовах випробування на стійкість до впливу термітів проводять на дослідних майданчиках з високою щільністю термітів на 100 зразках або на 20-метрових стрічках кожного матеріалу.

**Оцінку стійкості матеріалів до впливу молі** проводять в термостатах при температурі  $24\pm 1^{\circ}\text{C}$  і відносній вологості повітря  $65\pm 8\%$  протягом 14 діб. У термостати поміщають садки зі зразками і личинками молі. Стійкість зразків до пошкодження міллю оцінюють за втраченою ними масою.

### **11.4 Випробування на стійкість матеріалів до впливу гризунів**

Для проведення випробувань виробів та матеріалів РЕЗ на стійкість до впливу гризунів використовуються дорослі особи гризунів.

Перед початком випробувань їх дресирують, щоб привчити діставати їжу, долаючи перешкоду.

У якості перепон під час дресирування використовують картон товщиною 2...3 мм.

При випробуванні перешкодою служать зразки з матеріалів, що підлягають випробуванню.

Клітини для проведення випробувань виготовляють з каркаса і сітчастих металевих стінок з комірками розміром не більше 5...8 мм. В середині клітини є перегородка з отвором 70 x 70 мм, яка закривається перешкодою.

Тривалість випробувань становить 24 год. Після закінчення випробувань зразки оглядають, відзначають характер пошкоджень і їх розміри.

Вважається, що зразки витримали випробування, якщо вони непошкоджені (бал 0) або на поверхні є сліди зубів гризунів у вигляді неглибоких подряпин (бал 1).

## 12 РАДІАЦІЙНІ ТА КОСМІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ

### 12.1 Випробування на радіаційні впливи

#### 12.1.1 Види іонізуючого випромінювання

Види іонізуючого випромінювання наведені у табл. 12.1.

Таблиця 12.1 - Види іонізуючого випромінювання (ІВ)

Найменування ІВ	Визначення ІВ
1	2
Фотонне ІВ	Електромагнітне непряме ІВ
Гамма-випромінювання	Фотонне випромінювання, що виникає при зміні енергетичного стану атомних ядер або при анігіляції частинок
Тормозне випромінювання	Фотонне випромінювання з безперервним енергетичним спектром, що виникає при зменшенні кінетичної енергії заряджених частинок
Характеристичне випромінювання	Фотонне випромінювання з дискретним енергетичним спектром, що виникає при зміні енергетичного стану електронів атому
Рентгенівське випромінювання	Фотонне випромінювання, що складається з тормозного та характеристичного
Корпускулярне випромінювання	ІВ, що складається з частинок з масою, яка відрізняється від нуля. До нього також відноситься нейтринне випромінювання
Альфа-випромінювання	Корпускулярне випромінювання, що складається з частинок, які випромінюються при ядерних перетвореннях
Електронне випромінювання	Корпускулярне випромінювання, що складається з електронів та позитронів
Бета-випромінювання	Електронне випромінювання, що виникає при бета-розпаді ядер або нестабільних частинок
Конверсійні електрони	Електронне випромінювання, що виникає при внутрішній конверсії гамма-випромінювання

Продовження табл. 12.1

1	2
Фотоелектрони	Електронне випромінювання, що виникає при фотоелектричній взаємодії фотонного випромінювання з речовиною
Комптонівські електрони	Електронне випромінювання, що виникає при комптонівському розсіянні фотонного випромінювання
Електрони Оже	Електронне випромінювання, що виникає при переході атомів зі збудженого стану у енергетичний
Протонне випромінювання	Корпускулярне випромінювання, що складається з ядер $H_1$
Нейтронне випромінювання	Корпускулярне випромінювання, що складається з нейтронів
Холодні нейтрони	Нейтронне випромінювання з середньою енергією нейтронів, меншою за середню енергію атомів довкілля
Теплові нейтрони	Нейтронне випромінювання, що знаходиться у термодинамічній рівновазі з атомами середовища
Проміжні нейтрони	Нейтронне випромінювання з енергією нейтронів в інтервалі від середньої енергії теплових нейтронів до 200 кеВ
Швидкі нейтрони	Нейтронне випромінювання з енергією нейтронів в інтервалі від 200 кеВ до 20 МеВ
Надшвидкі нейтрони	Нейтронне випромінювання з енергією нейтронів більш 20 МеВ
Мезонне випромінювання	Корпускулярне випромінювання, що складається з мезонів
Нейтринне випромінювання	Корпускулярне випромінювання, що складається з нейтрино
Космічне випромінювання	ІВ, що складається з первинного ІВ, яке надходить з космічного простору, та вторинного ІВ, яке виникає в результаті взаємодії первинного ІВ з середовищем

Продовження табл. 12.1

1	2
Моноенергетичне ІВ	ІВ, що складається з фотонів однакової енергії або частинок одного виду з однаковою кінетичною енергією
Немоноенергетичне ІВ	ІВ, що складається з фотонів різної енергії або частинок одного виду з різною кінетичною енергією
Суміщене ІВ	ІВ, що складається з частинок різного виду або з частинок та фотонів
Спрямоване ІВ	ІВ з визначеним напрямком розповсюдження
Дифузне ІВ	ІВ, яке не має визначеного напрямку розповсюдження
Поляризоване ІВ	ІВ, що складається з частинок з визначеною орієнтацією спинів та фотонів з визначеною орієнтацією електричного вектора
Природний фон ІВ	ІВ, що складається з космічного випромінювання та ІВ природно розподілених натуральних радіоактивних речовин
Фон ІВ	ІВ, що складається з природного фону та ІВ сторонніх джерел

### 12.1.2 Вплив радіаційного випромінювання на працездатність РЕЗ

Радіаційний вплив викликає як негайну, так і накопичувану реакцію елементів, які входять у склад РЕЗ.

Серед існуючих видів випромінювань найбільшу небезпеку представляють електромагнітні випромінювання і іонізуючі частинки високих енергій.

Повний спектр електромагнітних випромінювань охоплює діапазон довжин хвиль від десятків тисяч метрів до тисячних часток нанометра. Найбільш істотний вплив на РЕЗ надають гамма і рентгенівське випромінювання (довжина хвиль менше 10 нм). Ці види випромінювання мають значну проникаючу і іонізуючу здатність.

Істотний вплив на конструкцію РЕЗ можуть також надавати заряджені частинки: альфа, бета і протони, а також нейтрони, що мають високу проникаючу здатність.

Найбільш стійкі до впливу опромінення метали. Найменшу радіаційну стійкість серед них мають магнітні матеріали і електротехнічні сталі. Деякі метали, наприклад марганець, цинк, молибден та ін. після опромінення нейтронами самі стають радіоактивними.

Вплив випромінювання на полімери призводить до руйнування міжмолекулярних зв'язків, утворення зернистих структур і мікротріщин. В результаті полімерні деталі втрачають еластичність, стають крихкими.

Найменш стійкими до опромінення є напівпровідникові прилади і інтегральні мікросхеми. Необоротні дефекти в напівпровідниках приводять до втрати випрямних властивостей діодів, транзистори всіх типів при опроміненні втрачають підсилювальні властивості, в них зростають струми витоку, пробивна напруга знижується. Їх стійкість до радіації становить  $10^{12} \dots 10^{14}$  нейтронів /  $\text{см}^2$  при опроміненні нейтронами і  $10^4 \dots 10^7$  рад при гамма-опроміненні.

В інтегральних мікросхемах при опроміненні істотно змінюються характеристики внаслідок зміни параметрів резисторів, конденсаторів, діодів, транзисторів, що входять до їх складу. Також змінюються ізолюючі властивості розділових р-п-переходів, зростають струми витоку, з'являються численні паразитні зв'язки між елементами структури мікросхем, що в результаті призводить до порушення їх функціонування.

### **12.1.3 Засоби вимірювань радіаційного випромінювання**

*За видом випромінювання*, що реєструється, розрізняють дозиметричні прилади для:

- м'якого рентгенівського випромінювання;
- рентгенівського та гамма-випромінювання;
- бета- та гамма-випромінювання;
- інших важких заряджених частинок;
- нейтронів.

*За способом реєстрації випромінювання* у відповідності з фізичними методами дозиметрії розрізняють дозиметричні прилади:

- іонізаційні;
- люмінісцентні (сцинтиляційні);
- напівпровідникові;
- фотодозиметричні;
- хімічні;
- калориметричні.

Найширше застосовуються іонізаційні та люмінісцентні дозиметричні прилади.

*В залежності від параметрів, що вимірюються*, розрізняють дозиметричні прилади, призначені для вимірювання дози або потужності дози випромінювання (рентгенометри або дозиметри), та прилади, що вимірюють активність або щільність потоку ІВ (радіометри).

*За типом пристрою реєстрації* бувають прилади, які показують результат, та інтегруючі, які сумують результат вимірювань за певний проміжок часу.

Принцип дії іонізаційних приладів заснований на використанні явища взаємодії ІВ з речовиною, при якому частина енергії випромінювання передається атомам цієї речовини та витрачається на їх іонізацію. Під дією радіоактивного випромінювання повітря між обкладинками конденсатора іонізується та його молекули й атоми з електрично нейтральних перетворюються на заряджені іони, викликаючи струм у ланцюгу, пропорційний інтенсивності випромінювання.

#### **12.1.4 Особливості випробувань на радіаційні впливи**

Принциповою особливістю проведення радіаційних випробувань РЕЗ є дистанційний контроль реєстрованих параметрів РЕЗ в процесі і після опромінення. При цьому для забезпечення дистанційного контролю застосовують спеціалізовані вимірювальні лінії, що враховують специфіку модельованого радіаційного впливу.

Типова модель організації випробувань РЕЗ на радіаційні впливи на моделюючій установці (МУ) представлена блок-схемою, що наведена на рис. 12.1.

Випробування проводять у такий спосіб.

Об'єкт випробувань розміщують в експериментальному об'ємі технологічного приміщення (ТП), в якому розташовується моделююча установка. Біологічний захист необхідний для локалізації модельованих іонізуючих випромінювань усередині технологічного приміщення і забезпечення безпеки персоналу та контрольновимірювальної апаратури (КВА), що розміщена в приміщенні для вимірювань.

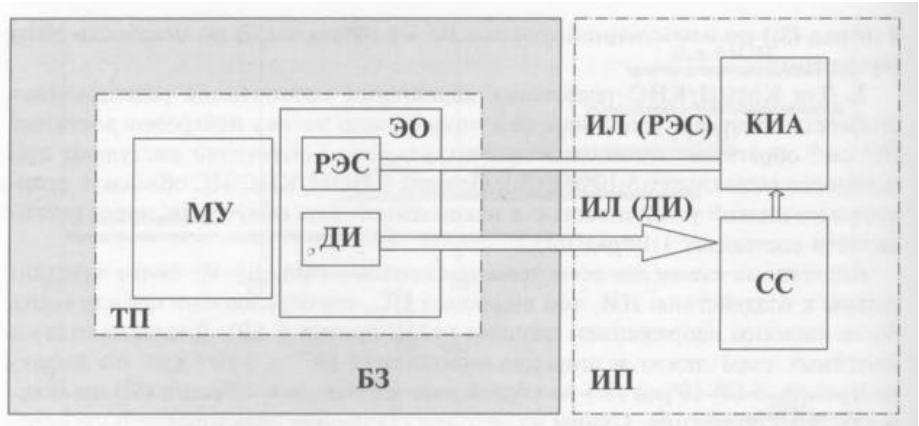
Передбачуваний рівень модельованого впливу задають за допомогою картограм полів випромінювання шляхом вибору відстані від об'єкта випробувань до вивідного вузла МУ.

Конкретне значення досягнутих при випробуваннях рівнів опромінення визначають в процесі випробувань за показниками дозиметрів, тип яких залежить від модельованого впливу. Датчики випромінювання формують електричний сигнал, що характеризує форму модельованого впливу. На імпульсних моделюючих установках цей сигнал використовується для синхронізації роботи КВА і моделюючої установки, а також для визначення потужних характеристик впливаючого фактору.

Реакція РЕЗ по вимірювальній лінії надходить для реєстрації на вимірювальні входи КВА. За допомогою КВА по вимірювальній лінії також задають необхідні електричні режими РЕЗ.

Наявність необхідного біологічного захисту технологічного обсягу обмежує мінімальну довжину вимірювальних ліній, що особливо важливо враховувати при розробці вимірювальних методик, які повинні забезпечувати максимальну достовірність отриманих результатів.

Відмінною особливістю проведення випробувань на імпульсних прискорювачах є наявність супутніх електромагнітних завад досить високого рівня. Тому необхідно використовувати спеціальні методи захисту вимірювальних ліній від впливу електромагнітних наведень.



МУ - моделююча установка; ТП - технологічне приміщення; ЭО - експериментальний обсяг; БЗ - біологічний захист; РЭС - радіоелектронний пристрій; ДИ - датчики випромінювання; ИП - вимірювальне приміщення; КИА - контрольно-вимірювальна апаратура; СС - система синхронізації; ИЛ (РЭС) - вимірювальна лінія РЕЗ; ИЛ (ДИ) - вимірювальна лінія ДВ

Рисунок 12.1 - Блок-схема організації дистанційних вимірювань при проведенні випробувань РЕЗ на МУ

## 12.2 Спеціальні космічні випробування

### 12.2.1 Випробування на забезпечення теплового режиму РЕЗ

Космічні умови найбільш впливають на тепловий режим РЕЗ. Метою випробувань космічної РЕЗ при відпрацюванні теплового режиму є:

- перевірка здатності РЕЗ, їх складальних одиниць і елементів в умовах реальних нестационарних градієнтів температури;
- дослідження температурних полів, що фактично формуються у відсіках, і взаємовпливів температурних полів різних приладів на працездатність РЕЗ, вибір оптимальної компоновки приладів і пристроїв;

- виявлення фактичних запасів температурних допусків РЕЗ;
- перевірка ефективності роботи систем терморегулювання в умовах, що максимально наближаються до реальних;
- дослідження роботи систем терморегулювання в аварійних ситуаціях;
- визначення ресурсу РЕЗ та їх складових частин;
- дослідження температурних деформацій конструкцій РЕЗ.

При моделюванні променистих потоків на низьких орбітах слід враховувати наступні умови:

- з будь-якої точки орбіти планету видно під більшим кутом (від  $140^\circ$  до  $160^\circ$ ) і внаслідок цього висвітлюється від 94 до 99,2% поверхні апарату;
- в будь-якій точці орбіти на елементарну площадку, орієнтація якої в системі Сонце - Земля зберігається постійною, падає одна й та ж кількість променевої енергії;
- напрямок відбитих від планети сонячних променів знаходиться в межах тілесного кута, під яким видно планета;
- зміна променистого потоку відбувається для всіх точок поверхні космічного апарату одночасно;
- три складові падаючого променистого потоку (пряме сонячне випромінювання, відбите від планети, і власне інфрачервоне випромінювання планети) змінюються в часі і просторі неоднаково.

Моделювання теплового режиму РЕЗ проводиться у вакуумній камері, де встановлюються імітатори Сонця, планети і орбіти.

Для випробувань вибирається повнорозмірний космічний апарат зі штатною функціонуючою апаратурою, точно такий же, який повинен піти в політ. На РЕЗ встановлюються необхідну кількість термодатчиків, що досить повно характеризують теплове поле і датчики інших величин.

Методика випробувань передбачає наступну послідовність операцій.

Підготовлений до випробувань виріб ретельно очищають від всіляких забруднень, які можуть погіршити вакуум, після чого його встановлюють на імітаторі орбіти.

До РЕЗ підключають контрольно-вимірювальну апаратуру і перевіряють в НКУ роботу бортових систем, КВА і програмно-часового устаткування, що задає режим у випробувальній камері.

Запускають систему вакуумування, а після досягнення тиску приблизно 0,01 Па включають криогенну систему охолодження екранів.

За командою програмно-часового устаткування, коли в камері встановиться необхідний режим випробувань, включають імітатори зовнішніх променистих потоків, імітатори орбіти і бортові РЕЗ.

Тривалість експерименту визначається умовами польоту і циклічністю роботи РЕЗ.

Параметри випробувального режиму (тиск, температура і т.д.) передаються на пульт управління за допомогою бортової телеметричної апаратури.

### 12.2.2 Випробування на роботу РЕЗ в умовах невагомості

Випробування на вплив невагомості на РЕЗ проводять з використанням засобів для створення короточасної невагомості в лабораторних умовах: вежі скидання, падаючий ліфт, політ літака за кеплерівською траєкторією або випробувальні польоти ракети за балістичними траєкторіями для створення тривалої невагомості.

Короточасний стан невагомості досягається в **спеціально обладнаному літаку, що виконує політ за кеплерівськими траєкторіями**. Якщо при швидкості 800 км/год. невагомість триває 34 с, то в надзвуковому літаку - приблизно 4 хв.

Для усунення збуджуючих механічних сил (наприклад, вібрації) виробу і контрольно-вимірювальні прилади розміщують в «плаваючих» контейнерах, розтяжки яких відстібаються при досягненні стану невагомості.

Інший спосіб створення невагомості - **використання вертикальних веж скидання**. Оскільки створити умови вакууму для усунення сил аеродинамічного гальмування всередині вежі складно, то застосовують падаючі капсульовані контейнери, усередині яких виробу і реєструюча апаратура знаходяться у вакуумі. Перед скиданням виріб тривалий час може знаходитися в стані спокою, що буває важливо для "заспокоєння" рідких теплоносіїв.

### **12.2.3 Випробування на вплив потоків твердих частинок, сонячного вітру та різних видів випромінювання**

**Моделювання потоків твердих частинок** при випробуванні на вплив мікрометеорів в лабораторних умовах можна проводити за допомогою прискорювачів, що працюють на стиснутих газах; електромагнітних і водневих джерел вибухових прискорювачів, в яких використовуються кумулятивні заряди; плазмових і лазерних прискорювачів, електростатичних прискорювачів різних типів.

Для моделювання взаємодії сонячного вітру і нестационарних потоків плазми електросфери і протосфери Землі з поверхнями матеріалів при випробуваннях в лабораторних умовах використовуються плазмові прискорювачі, прискорювачі заряджених частинок і високочастотний розряд.

Особливості моделювання корпускулярного випромінювання і його впливу на виріб при випробуванні, на відміну від радіаційних випробувань РЕЗ, полягають у тому, що прискорювачі заряджених частинок повинні забезпечувати одночасне опромінення досліджуваних матеріалів електронами і позитивними іонами, причому електронні і протонні пучки повинні мати рівномірну щільність і дозволяти опромінювати в вакуумі поверхні до  $100 \text{ см}^2$ . Доцільно змінювати енергію частинок в широкому діапазоні і використовувати установки з безперервним циклом прискорення частинок (прискорювачі високовольтні, електростатичні і т.ін.)

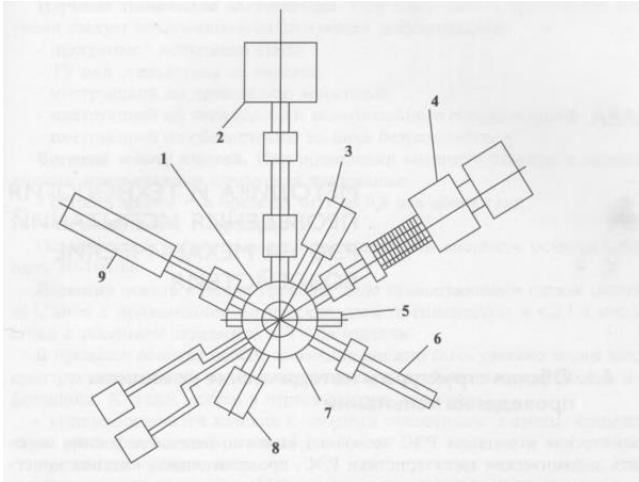
Бажано мати можливість перетворювати моноенергетичні пучки заряджених частинок в пучки із суцільним енергетичним спектром, аналогічним космічному.

### **12.2.4 Комплексні космічні випробування**

Матеріали і блоки РЕЗ, що працюють в космічних умовах, бажано піддавати комплексному впливу факторів.

На рис. 12.2 приведена схема установки, яка дозволяє проводити випробування при спільній або роздільній дії факторів космічного простору.

Об'єм камери дорівнює  $0,3 \text{ м}^3$ , вакуум створюється до  $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$ , температура змінюється від  $-150$  до  $+200 \text{ }^\circ \text{C}$ .



1 - термовакуумна камера; 2 - прискорювач електронів; 3 - імітатор Сонця; 4 - прискорювач протонів; 5 - мас-спектрометр; 6 - вакуумний фотометр; 7 - криогенний насос; 8 - розрядний насос; 9 - вакуумна розривна машина

Рисунок 12.2 - Схема установки для проведення випробувань при спільній або роздільній дії факторів космічного простору

## 13 АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ РЕЗ

На даний час питання впровадження у виробництво радіоелектронних засобів підсистем і пакетів прикладних програм для автоматизації аналізу різних характеристик РЕЗ набуває все більшої актуальності, оскільки це дає значний економічний ефект за рахунок скорочення натурних випробувань і пов'язаною з цим тривалістю проектування.

Сучасний стан систем автоматизованого проектування (САПР) можна охарактеризувати як час масового переходу промисловості до використання технологій 3D-проектування.

Розглянемо деякі з основних САПР, які здійснюють 3D-проектування та інженерний аналіз.

### 13.1 Система Nastran

Система забезпечує повний набір розрахунків, включаючи розрахунок напружено - деформованого стану, власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, рішення задач теплопередачі, дослідження сталих і несталих процесів, акустичних явищ, нелінійних статичних процесів, нелінійних динамічних перехідних процесів, розрахунок критичних частот і вібрацій роторних машин, аналіз частотних характеристик при впливі випадкових навантажень, спектральний аналіз і дослідження аеропружності.

У системі передбачена можливість моделювання практично всіх типів матеріалів, включаючи композитні та гіперпружні. Розширені функції включають технологію суперелементів (підконструкцій), модальний синтез і макромову DMAP для створення призначених для користувача додатків.

Однак цій системі притаманна деяка універсальність і спрямованість на механічне проектування. Для використання системи в розрахунках вузлів на друкованих платах, що мають свою специфіку, потрібна доробка. Тут також слабо розглянуті питання аналізу електромагнітної сумісності.

## 13.2 Система ANSYS

Програмний комплекс **ANSYS** є єдиною програмною платформою для реалізації повного циклу розробки нового виробу від технічного завдання на етапі проектування до перевірки правильності прийнятих рішень.

За допомогою модулю **ANSYS Mechanical** може проводитися розрахунок термомеханічних напружень в напівпровідниках, електронних модулях, друкованих платах і замкнених системах. Крім того, інженери при проведенні модального аналізу, вивчення ударних навантажень і вібрацій можуть враховувати нелінійні явища в конструкції виробу, включаючи втому паяних з'єднань, розшарування і повзучість.

Програмний комплекс **ANSYS AUTODYN** може використовуватися для моделювання ударних випробувань з метою оптимізації робочих характеристик і надійності виробу.

Програмний продукт **ANSYS Icepak** використовується для оцінки температурного стану електронних пристроїв в цілому і окремих вузлів зокрема. Він дозволяє моделювати всі види теплообміну: природну і вимушену конвекцію, теплообмін випромінюванням і теплопровідність.

**CFD-комплекси** використовуються для акустичного аналізу, вивчення мікроканалів, багатофазних потоків, фазових переходів і ін. Крім того, вони застосовуються в процесі виробництва напівпровідників, зокрема, при моделюванні процесів травлення, фотолітографії, хімічного осадження з газової фази і ін.

Аналізуючи можливості системи **ANSYS** можна сказати, що вона найбільш повно відповідає сучасним вимогам інженерного аналізу і оптимізації друкованих вузлів РЕЗ.

## 13.3 Система T-FLEX

Комплекс **T-FLEX** дозволяє вирішити практично всі завдання конструкторсько-технологічної підготовки виробництва - від отримання замовлення до виготовлення виробу. При цьому за функціональністю кожна з систем комплексу **T-FLEX** конкурує з кращими зразками подібних продуктів.

Аналізуючи можливості системи T-FLEX, можна виявити досить хороше опрацювання проектної та технологічної складових проектування. Відмінною особливістю є підтримка не тільки сучасного, але і більш старого обладнання, що важливо для ряду вітчизняних підприємств.

Однак в цій системі відсутні засоби аналізу і оптимізації друкованих вузлів РЕЗ.

TFLEX має строгу спрямованість на механічне проектування, але дозволяє визначити деякі основні характеристики міцності і провести теплові розрахунки.

### 13.4 Система Pro/ENGINEER

Розширені можливості модуля *Pro /ENGINEER Structure and Thermal Simulation* дозволяють вирішити багато завдань моделювання.

Він має наступні можливості:

- статичний аналіз для розрахунку напружень і переміщень, включаючи контактні нелінійні задачі;
- модальні рішення для незакріпленої і закріпленої моделі;
- можливості розрахунків на стійкість, які дозволяють визначити критичні для конструкції навантаження;
- аналіз стаціонарної теплопередачі для оцінки впливу на модель постійного теплового навантаження і граничних умов.

Аналізуючи можливості модуля *Pro/MECHANICA* системи Pro/ENGINEER можна зробити висновок, що це досить потужний інструмент механічного та температурного аналізу конструкцій, який дозволяє проводити більшість необхідних видів розрахунків і оптимізацій. Однак варто відзначити в основному його спрямованість на вирішення задач в області механічного проектування і слабке опрацювання аналізу і оптимізації вузлів на друкованих платах РЕЗ.

### 13.5 Система АСОНІКА

Система забезпечення надійності та якості апаратури (АСОНІКА) включає в себе декілька підсистем, кожна з яких спрямована на вирішення конкретного завдання.

Автоматизована підсистема *АСОНІКА-В* призначена для аналізу механічних характеристик конструкцій шаф, стійок і блоків РЕЗ, встановлених на віброізоляторах.

Підсистема *АСОНІКА-М* призначена для автоматизації процесу моделювання неамортизованих конструкцій РЕЗ на механічні дії.

Після моделювання конструкцій третього та другого рівнів (шаф, блоків і т.п.) результати передаються в підсистему *АСОНІКА-ТМ* для моделювання механічних процесів в конструкціях першого рівня РЕЗ (друкованих вузлів, касет і т.п.).

Підсистема *АСОНІКА-Т* використовується для визначення теплових режимів роботи всіх ЕРЕ, ПФЕ та матеріалів несучих конструкцій і внесення змін в конструкцію з метою досягнення заданих коефіцієнтів навантаження.

Підводячи підсумки, можна відзначити наступні загальні недоліки, властиві підсистем *АСОНІКА*:

- слабкий зв'язок з сучасними системами 3D проектування, що серйозно обмежує застосовність системи;
- відсутність у ряду підсистем власного вирішувальника, що призводить до необхідності придбання продуктів сторонніх виробників, часто дорогих;
- недостатня реалізація засобів оптимізації конструкцій, що збільшує витрати на проектування як тимчасові, так і матеріальні.

У зв'язку зі сказаним вище і в порівнянні з розглянутими системами інженерного аналізу система АСОНІКА має вельми скромні можливості, що серйозно обмежує її застосування на сучасних підприємствах.

### 13.6 Система SolidWorks

САПР **SolidWorks** є одним з найбільш поширених САД-пакетів, який забезпечує можливість створення геометричних моделей конструкцій електронних пристроїв і цілих радіоелектронних систем

безпосередньо в цьому пакеті, а також включає вбудовані засоби чисельного аналізу для перевірки прийнятих рішень без виконання конвертації геометричних моделей.

На відміну від відомої програми кінцево-елементного аналізу ANSYS, пакет SolidWorks має інтерфейс і інструментарій, більшою мірою орієнтований на вирішення прикладних інженерних задач.

Модуль *SolidWorks Flow Simulation* дозволяє моделювати потоки рідини і газу в умовах реального часу, запускати сценарії "що, якщо" і ефективно аналізувати наслідки потоку рідини, теплообміну і пов'язаних сил, що діють на компоненти і проходять через них. У рішенні також можна швидко порівнювати варіанти проекту, щоб оптимізувати прийняття рішень і виробляти більш ефективні вироби.

За допомогою вбудованого модуля охолодження електроніки (*Electronic Cooling*) є можливість моделювати та аналізувати досить складні теплові режими роботи РЕЗ.

Цей модуль містить спеціальні інструменти моделювання для досліджень управління теплообміном. Він ідеально підходить для вирішення задач теплообміну виробів та точного аналізу теплообміну в друкованих платах і корпусах.

SolidWorks Flow Simulation можна використовувати для вирішення наступних задач:

- точне визначення розмірів каналів повітряводів і нагріву з урахуванням матеріалів, ізоляції та температурного комфорту;
- вивчення і візуалізація повітряного потоку для оптимізації систем і розподілу повітря;
- віртуальні випробування виробів в цифровому середовищі, максимально наближеному до реального;
- моделювання охолодження електронних приладів;
- моделювання внутрішнього управління температурою для вирішення проблем перегріву;
- оптимізація розташування вентиляторів і траєкторій повітряного потоку;
- прогнозування шуму, створюваного спроектованою системою.

### 13.7 Загальні висновки щодо можливостей застосування САПР при випробуваннях РЕЗ

Підводячи підсумки огляду сучасних САПР, інженерного аналізу та технологічної підготовки виробництва можна зробити висновок, що в якості базового програмного продукту доцільно вибрати систему **Pro/ENGINEER**. Ця система має широкі можливості щодо забезпечення ефективної розробки і випуску конкурентоспроможної продукції.

Однак в цій системі слабо реалізовані можливості інженерних розрахунків вузлів на друкованих платах, що становлять основу радіоелектронного обладнання. Зокрема, немає можливості аналізу електромагнітної сумісності, аналіз теплового режиму складних багатошарових плат, що мають власне тепловиділення, аналізу цілісності сигналу і ін.

Для розширення можливостей Pro/ENGINEER доцільно застосувати систему **ANSYS**, яка досить ефективно виконує ці види аналізу, крім того, дозволяє вільну інтеграцію з сучасними CAD-системами, в тому числі і з Pro/ENGINEER.

З використанням в якості бази інструментальних засобів аналізу системи Pro/ENGINEER (Structure and Thermal Simulation) загальна методика проведення моделювання теплових і механічних характеристик (при інтеграції з ANSYS також і EMC) включає наступні основні етапи:

- створення 3D моделей конструкції;
- аналіз вимог ТЗ і умов експлуатації, виділення основних типів зовнішніх і внутрішніх впливів (механічні навантаження, тепловиділення);
- визначення конкретної форми факторів, що впливають (вібрація, удари, лінійні прискорення, температура, тепловий потік, температурний градієнт і т.ін.) і їх кількісних параметрів;
- формування комплексу задач моделювання і їх відповідність типовим математичним постановкам у формі відповідних задач математичної фізики;
- визначення та завдання кількісних параметрів граничних умов: межі областей з різними типами впливів, об'ємні і плоскі джерела енергії, взаємодія з навколишнім середовищем і

конструкціями вищого рівня ієрархії (наприклад, визначення коефіцієнтів теплообміну) і т.д.;

- завдання параметрів, що входять в граничні умови, засобами Structure and Thermal Simulation безпосередньо на 3D моделі конструкції;

- проведення розрахунків і аналіз результатів.

При цьому основним етапом, що визначає адекватність і точність результатів моделювання, є вибір класу розв'язуваної задачі, що визначається видом базового диференціального рівняння (Лапласа, Пуассона, Фур'є і т.д.), формування і завдання граничних умов для 3D моделі конструкції з ефективним використанням можливостей, які подаються Structure and Thermal Simulation. Тому доцільним є розвиток комплексу постановок задач моделювання для всіх основних видів аналізу, визначення типових характеристик РЕЗ, найбільш широко застосовуваних конструкцій (з урахуванням їх ієрархії) і зовнішніх впливів (бібліотеки моделей), і створення для кожної з таких моделей власних методик їх реалізації засобами Pro/ENGINEER (Structure and Thermal Simulation).

Для моделювання теплових режимів РЕЗ найбільш доцільно використовувати модуль **SolidWorks Flow Simulation**.

## ЛІТЕРАТУРА

1 ДСТУ 8216:2015. Вироби електронної техніки. Класифікація за умовами застосування та вимоги стійкості до зовнішніх впливових чинників [Текст]. – Введ. 2017–01–04. – К.: Держспоживстандарт України, 2017. – 11 с.

2 ДСТУ 3021–95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення [Текст]. – Введ. 1996-01-01. – К.: Держспоживстандарт України, 1995. – 70 с.

3 ДСТУ 3011-95. Устаткування випробувальне кліматичне та механічне. Терміни та визначення [Текст]. - Введ. 1996–01–01. – К.: Держспоживстандарт України, 1995. – 36 с.

4 ГОСТ 2.106-96. Единая система конструкторской документации. Текстовые документы [Текст]. – Введ. 1976-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 39 с.

5 ГОСТ 11478-88 Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Технические требования и методы испытаний в части механических и климатических воздействий [Текст]. – Взамен ГОСТ 11478-83; введ. 1990-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 44 с.

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 [Текст]. – Введ. 1971-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 60 с.

7 ГОСТ 16019-2001. Аппаратура сухопутной подвижной радиосвязи. Требования по стойкости к воздействию механических и климатических факторов и методы испытаний [Текст]. – Введ. 2002-01-01. – Минск.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. – 15 с.

8 ГОСТ 16962-71. Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний [Текст]. – Введ. 1971-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 105 с.

9 ГОСТ 20.57.406-81. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний [Текст]. – Введ. 1982-01-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 133 с.

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

упаковка, транспортирование и хранение [Текст]. – Введ. 1982-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 39 с.

11 Випробування приладів і систем. Види випробувань та сучасне обладнання: навчальний посібник [Текст] / В. В. Аврутов, І. В. Аврутова, В. М. Попов // НТУУ «КПІ». — Київ: НТУУ «КПІ», 2009. - 64 с.

12 Голобородько, М.Ю. Загальні вимоги до видів, послідовності та умов проведення випробувань радіоелектронного обладнання [Текст] / 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 Федоров, В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве РЭС [Текст] / В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. - М.: Техносфера, 2005. – 504 с.

14 Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование [Текст]: учеб. пособие для вузов / О.П. Глудкин, А.Н. Енгальчев, А.И. Коробив; под ред. А.И. Коробова. - М.: Радио и связь, 1987. - 272 с.: ил.

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

16 Никитин, С.А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля [Текст]: учебное пособие / С.А. Никитин, С.В. Бойко. - Изд 2-е перераб. и доп. - Оренбург.: ГОУ ОГУ, 2004. - 462 с.

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

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

19 Никитин, Л.Н. Испытания и диагностика телевизионных систем: испытания радиоэлектронной аппаратуры [Текст]: учеб. пособие / Л.Н. Никитин. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2009. - 253 с.

20 Вибрации в технике: Справочник [Текст]: 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.

21 Каталог продукции SOVTEST [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://sovtest-ate.com/>

22 Каталог продукции ТЕХНОПРИСТ [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://technoprist.ru/>

23 Каталог продукции ООО "ЕМТ" [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.emtld.com/>

24 Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://works.doklad.ru/view/qFYKo9zlmBk.html>

25 Преобразователи виброизмерительные [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://standart-m.com.ua/>

26 Оптический преобразователь и способ его установки [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://patents.su/4-1415070-opticheskijj-vibropreobrazovatel-i-sposob-ego-ustanovki.html>

27 Датчики виброускорения [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://ukrsk.com.ua/>

28 Каталог продукции "ЭлекТрейд-М" [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.eltm.ru/>

29 Каталог продукции "ТатКлиматМаш" [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://tatklimatmash.ru/>

## Додаток А. Титульний аркуш ПВ

---

(назва підприємства-виробника)

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Керівник організації  
що проводить випробування  
\_\_\_\_\_  
(ПБ)  
" \_\_ " \_\_\_\_\_ 20 р.

## ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ДЕРЖАВНИХ ПРИЙМАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ

---

(повна назва, тип, об'єкт випробувань)

---

(позначення документа)  
на \_\_ аркушах

Начальник відділа-розробника  
\_\_\_\_\_  
(ПБ)  
" \_\_ " \_\_\_\_\_ 20 р.

Керівник  
\_\_\_\_\_  
(ПБ)  
" \_\_ " \_\_\_\_\_ 20 р.

20\_\_ рік

## **Додаток Б. Приклад оформлення ПВ (об'єкт випробувань: засіб вимірювання)**

### **1 ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ**

На випробування пред'являються \_\_\_\_\_  
(кількість зразків, найменування

\_\_\_\_\_ ,  
засобу вимірювання)

що прийняті та опломбовані відділом технічного контролю підприємства-виготівника, а також комплект документації:

- технічне завдання;
- проект технічних умов;
- експлуатаційні документи (технічний опис, інструкція з експлуатації, формуляр, паспорт, етикетка);
- нормативно-технічний документ з перевірки;
- карта технічного рівня;
- складальне креслення;
- акт та протоколи попередніх випробувань;
- розрахунки надійності (на вимогу замовника);
- проект опису типу засобу вимірювання;
- акт експертизи про можливість опублікування опису типу засобу вимірювання у відкритому друку;
- фотографії загального вигляду засобу вимірювання;
- програма державних приймальних випробувань або висновок метрологічного інституту про можливість проведення випробувань за типовою програмою.

### **2 МЕТА ДЕРЖАВНИХ ПРИЙМАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ**

У процесі державних приймальних випробувань повинні бути проведені: оцінка технічного рівня засобу вимірювання, перевірка відповідності зразків засобу вимірювання ТЗ, проекту ТУ, конструкторській документації (КД); експериментальна перевірка операцій перевірки, перевірка сумісності розробленого засобу вимірювання зі зразковими засобами вимірювань, що застосовуються при перевірці, висновки щодо можливості запуску засобу вимірювання у виробництво.

### 3 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

3.1 Державні приймальні випробування \_\_\_\_\_ (найменування засобу \_\_\_\_\_) проводяться за затвердженою програмою на відповідність вимірювання) стандартам.

3.2 Державні приймальні випробування проводяться на підприємстві з "\_\_\_" \_\_\_\_\_ по "\_\_\_" \_\_\_\_\_

### 4 ОБСЯГ ВИПРОБУВАНЬ

#### 4.1 Розгляд технічної документації (ТД) (див. табл.. Б.1)

Таблиця Б.1 - Розгляд ТД

Зміст вимог з розгляду ТД	Вказівки з методики розгляду ТД
1	2
4.1.1 Перевірка відповідності комплектності представленої ТД вимогам стандартів та ТЗ на виріб	Перевіряється відповідність ТД вимогам стандартів та ТЗ на виріб
4.1.2 Перевірка відповідності проекту ТУ вимогам ТЗ	Розглядається проект ТУ на відповідність вимогам ТЗ, надається оцінка його технічної доцільності
4.1.3 Оцінка достатності техніко-економічного обґрунтування розробки	Розглядається розрахунок техніко-економічної ефективності від впровадження розробки
4.1.4 Перевірка повноти, правильності і засобів виразу метрологічних характеристик, які нормуються у ТД, та їх відповідності стандартам	Розглядається проект ТУ на відповідність вимогам ТЗ
4.1.5 Перевірка повноти і правильності методів контролю та випробувань	Розглядається проект ТУ на відповідність вимогам ТЗ
4.1.6 Оцінка забезпечення засобами перевірки при серійному виробництві, після ремонту та у процесі експлуатації, необхідності розробки нових зразкових засобів вимірювання	Висновки даються на підставі порівняння метрологічних характеристик засобу вимірювання та засобів його повірки.

Продовження табл. Б.1

1	2
4.1.7 Перевірка комплектності, достатності та якості ЗІП	Перевіряється відповідність проекту ТУ вимогам ТЗ, оцінюється достатність ЗІП
4.1.8 Перевірка комплектності, складу та якості математичного забезпечення обчислювальних засобів	Перевіряється відповідність проекту ТУ вимогам ТЗ, оцінюється достатність математичного забезпечення
4.1.9 Перевірка обґрунтування та достатності вимог до кваліфікації персоналу	Оцінюється обґрунтування вимог, що пред'являються до кваліфікації персоналу
4.1.10 Оцінка достатності прийнятих конструктивних рішень і організаційно-технічних заходів з забезпечення безаварійності та безпеки роботи	Оцінюється обґрунтування вимог, що пред'являються до забезпечення безаварійності та безпеки роботи
4.1.11 Оцінка достатності, обсягу та періодичності технічного обслуговування об'єкта випробувань, що задані у ТД	Розглядається у зв'язку з рекомендованими параметрами надійності
4.1.12 Перевірка рівня завадо захищеності об'єкта випробувань на відповідність вимогам ТЗ, ТУ	Оцінюється рівень завадозахищеності на відповідність вимогам проекту ТУ
4.1.13 Перевірка правильності вибору та розрахунків показників надійності, методів та засобів їх контролю, а також інтервалів між перевірками та їх відповідності показникам надійності	Перевірку проводять за документацією на відповідність стандартам
4.1.14 Розгляд матеріалів попередніх випробувань	Оцінюється достатність проведених випробувань, відповідність їх результатів вимогам ТУ та ТЗ. За необхідністю розробляються заходи з усунення виявлених недоліків
4.1.15 Розгляд карти технічного рівня та якості. Оцінка повноти порівняння з технічними характеристиками аналога	Оцінюється технічний рівень розробок у порівнянні з найкращими вітчизняними та зарубіжними аналогами

## 4.2 Експериментальне дослідження зразків

База випробувань та умови проведення випробувань визначаються вимогами ТЗ та ТУ.

Номенклатура параметрів, що перевіряються (обсяг випробувань) для конкретного об'єкта випробувань визначається вимогами ТЗ та проекту ТУ.

Можливі рекомендовані випробування наведені у табл.. Б.2.

Таблиця Б.2 - Рекомендовані випробування (об'єкт випробувань - засіб вимірювань)

Зміст випробувань	Пункт ТЗ	Пункт вимог ТУ	Пункт методи ки ТУ	Обладнання випробувань, засоби вимірювань
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
4.2.1 Перевірка відповідності засобу вимірювань вимогам КД та комплекту поставки				
4.2.2 Перевірка електричної міцності ізоляції				
4.2.3 Перевірка опору ізоляції				
4.2.4 Визначення нормованих метрологічних характеристик у НКУ				
4.2.4.1 Визначення діапазонів вимірювань				
4.2.4.2 Визначення основної похибки засобу вимірювань				
4.2.4.3 Визначення чуттєвості та дискретності				
4.2.4.4. Визначення стабільності характеристик за строк, що регламентований у ТЗ і ТУ				
4.2.5 Визначення динамічних характеристик				

Продовження табл. Б.2

1	2	3	4	5
4.2.6 Перевірка характеристик засобу вимірювання у граничних робочих умовах і умовах транспортування				
4.2.6.1 Визначення додаткової похибки, що обумовлена зміною температури, напруги, частоти живлення та іншими ЗВФ				
4.2.6.2 Випробування на стійкість і міцність при кліматичних і механічних впливах в умовах експлуатації та транспортування				
4.2.6.3 Перевірка стійкості засобу вимірювань до спеціальних впливів (корозійна стійкість, вологонепроникненість тощо)				
4.2.7 Визначення вхідних та вихідних опорів, ємностей індуктивностей				
4.2.8 Визначення часу одного вимірювання				
4.2.9 Перевірка часу встановлення робочого режиму і тривалості безперервної роботи				
4.2.10 Перевірка споживної потужності				
4.2.11 Перевірка індустриальних радіо завод, що створюються засобом вимірювання під час роботи				

Продовження табл. Б.2

1	2	3	4	5
4.2.12 Перевірка роботи засобу вимірювання під час заміни змінних елементів				
4.2.13 Перевірка виконання інтерфейсних функцій; перевірка вихідних сигналів, що подаються на зовнішні пристрої				
4.2.14 Перевірка маси, габаритних розмірів				
4.2.15 Перевірка маркування, упаковки на відповідність КД				
4.2.16 Оцінка ремонтпридатності і можливості технічного обслуговування				
4.2.17 Перевірка системи діагностування і само діагностування				
4.2.18 Перевірка функціонування дослідного зразка з застосуванням програмних засобів				
4.2.19 Оцінка обґрунтування кількості і кваліфікації персоналу				
4.2.20 Оцінка зручності транспортування дослідного зразка та його складових				

Допускається застосування інших засобів вимірювання (що не вказані у графі 5), якщо вони забезпечують необхідні діапазон, точність та умови застосування.

## **5 УМОВИ І ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ**

5.1 Підготовка засобу вимірювання до випробувань повинна бути проведена у відповідності з вимогами проекту ТУ.

5.2 У процесі випробувань не дозволяється проведення налагоджувальних та настроювальних робіт, якщо вони не передбачені у експлуатаційній документації.

5.3 Випробування за п. 4.2.5 проводяться у НКУ.

## **6 ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗВІТНІСТЬ**

6.1 Результати розгляду ТД за п. 4.1 та експериментальної перевірки зразків за п. 4.2 оформлюють протоколами з вказівкою кількісних значень, що отримані у результаті випробувань (див. додаток В).

Протоколи підписуються співробітниками, що проводили випробування.

6.2 У разі виявлення відмов складається зведена відомість відмов за формою, наведеною у додатку Г.

6.3 За результатами випробувань складається акт за встановленою формою.

## Додаток В. Протокол випробувань

<b>Протокол випробувань (найменування об'єкта)</b>	
I. Об'єкт випробувань	1. Децимальний номер
	2. Заводський номер
	3. Дата випуску
II. Мета випробувань	1. Визначення відповідності РЕЗ встановленим в ТУ вимогам.
	2. Визначення кількісних характеристик надійності і встановлення їх відповідності заданим нормам.
	3. Виявлення схемних, конструктивних і виробничих дефектів, а також недоліків системи контролю якості.
	4. Виявлення ненадійних деталей, вузлів, блоків і встановлення причин, що викликають їх несправність та відмову.
III. Місце і час випробувань	1. Вказується найменування підрозділу, який проводив випробування.
	2. Час і дата початку та закінчення випробувань.
IV. Умови випробувань	Випробування проводяться у відповідності із спеціально розробленою методикою на підставі діючих ГОСТ, нормалей або іншої централізованої документації.
V. Результати випробувань	1. Наводяться відомості несправностей (відмов).
	2. Дається кількісна оцінка надійності випробовуваних виробів.
	3. Аналізуються результати випробувань.
VI. Висновки і рекомендації щодо підвищення надійності	Надаються висновки і рекомендації щодо підвищення надійності



*Навчальне видання*

**ПОСПЕСВА Ірина Євгеніївна  
ШИЛО Галина Миколаївна  
КУЛЯБА-ХАРИТОНОВА Тетяна Іванівна**

# **ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ**

*Навчальний посібник  
для студентів вищих навчальних закладів*

Комп'ютерний набір: *Поспесва І.Е.*  
Комп'ютерна верстка: *Дяченко О.О.*

Підписано до друку 12.10.2020. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 16,27.  
Тираж 100 прим. Зам. № 1083.

Національний університет «Запорізька політехніка» Україна, 69063, м.  
Запоріжжя, вул. Жуковського, 64 Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.



**Поспесва Ірина Євгенівна,  
старший викладач кафедри ІТЕЗ**



**Шило Галина Миколаївна,  
д.т.н., доцент, зав. кафедри ІТЕЗ**



**Куляба-Харитонова  
Тетяна Іванівна,  
старший викладач кафедри ІТЕЗ**

