

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет "Запорізька політехніка"

МЕТОДИКИ ВИПРОБУВАНЬ РЕЗ
НА ЗОВНІШНІ ВПЛИВИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни
“Методи та засоби дослідження РЕЗ”,
частина 2

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

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

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

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

Відповідальний за випуск: Шило Галина Миколаївна, канд.
техн. наук, доцент, зав. каф. ІТЕЗ

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

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

ЗМІСТ

1 ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА МЕХАНІЧНІ ВПЛИВИ.....	6
1.1 Впливи механічних факторів на РЕЗ.....	6
1.2 Випробування на механічний резонанс	8
1.2.1 Випробування на визначення резонансних частот конструкції (метод 100).....	8
1.2.2 Випробування на наявність резонансних частот конструкції в заданому діапазоні частот (метод 101)	9
1.3 Випробування на вібростійкість (метод 102)	10
1.3.1 Випробування на вібростійкість при впливі синусоїдальної вібрації	10
1.3.2 Випробування на вібростійкість при впливі широкосмугової випадкової вібрації	12
1.4 Випробування на віброміцність (метод 103)	13
1.4.1 Випробування методом частоти, що хитається	13
1.4.2 Випробування методом фіксованих частот у всьому діапазоні.....	19
1.4.3 Випробування шляхом впливу широкосмугового випадкової вібрації	20
1.4.4 Обладнання для випробувань на вібраційні впливи.....	21
1.5 Випробування на ударну міцність і стійкість.....	24
1.5.1 Випробування на ударну міцність (метод 104).....	24
1.5.2 Випробування на ударну стійкість (метод 105).....	27
1.5.3 Випробування на вплив одиночних ударів (метод 106).....	28
1.5.4 Обладнання для випробувань на ударні впливи	30
1.6 Випробування на вплив лінійного прискорення (метод 107)	33
1.7 Випробування на вплив акустичного шуму (метод 108).....	34
1.7.1 Випробування на вплив випадкового акустичного шуму... 35	
1.7.2 Випробування на вплив акустичного тону мінливої частоти	37
2 ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА КЛІМАТИЧНІ ВПЛИВИ	38
2.1 Впливи кліматичних факторів на РЕЗ.....	38
2.12 Випробування на температурні впливи	41
2.2.1 Випробування на вплив підвищеної температури (методи 201, 202)	41
2.2.2 Випробування на знижену температуру (методи 203, 204) 43	
2.2.3 Випробування на зміну температур (метод 205)	43

2.2.4 Обладнання для випробувань на температурні впливи	45
2.3 Випробування на вплив підвищеної вологості (методи 207, 208)	48
2.3.1 Випробування без конденсації вологи - безперервний режим	49
2.3.2 Випробування з конденсацією вологи - циклічний режим.	50
2.3.3 Обладнання для випробувань на підвищену вологість	54
2.4 Випробування на вплив інею і роси (метод 206)	56
2.5 Випробування на вплив соляного туману (метод 215)	57
2.6 Випробування на зовнішній вплив води (методи 207 - 220)	58
2.7 Випробування на вплив тиску - атмосферного та гідростатичного	61
2.7.1 Випробування на вплив зниженого атмосферного тиску (метод 209)	61
2.7.2 Випробування на вплив підвищеного атмосферного тиску (метод 210)	62
2.7.3 Випробування на вплив підвищеного гідростатичного тиску (метод 216)	63
2.8 Випробування на вплив пилу	63
2.8.1 Випробування на вплив статичного пилу (метод 213)	64
2.8.2 Випробування на вплив динамічного пилу (метод 212)	64
2.9 Випробування на вітростійкість	65
2.10 Випробування на вплив сонячного випромінювання (метод 211)	66
2.11 Випробування на герметичність (метод 401)	67
3 ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА БІОЛОГІЧНІ ВПЛИВИ	70
3.1 Випробування на вплив цвілевих грибів (метод 214)	70
3.2 Випробування на стійкість матеріалів до дії комах	72
3.3 Випробування на стійкість матеріалів до впливу гризунів	73
4 СПЕЦІАЛЬНІ ВИДИ ВИПРОБУВАНЬ РЕЗ	74
4.1 Випробування на радіаційні впливи	74
4.2 Спеціальні космічні випробування	75
4.2.1 Випробування на забезпечення теплового режиму РЕЗ	75
4.2.2 Випробування на роботу РЕЗ в умовах невагомості	77
4.2.3 Випробування на вплив потоків твердих частинок, сонячного вітру та різних видів випромінювання	78
4.2.4 Комплексні космічні випробування	78
5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ РЕЗ	80

5.1 Система Nastran	80
5.2 Система ANSYS	80
5.3 Система T-FLEX.....	81
5.4 Система Pro/ENGINEER.....	82
5.5 Система АСОНИКА	82
5.6 Система SolidWorks	83
5.7 Загальні висновки щодо можливостей застосування САПР при випробуваннях РЕЗ	84
ЛІТЕРАТУРА.....	86

1 ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА МЕХАНІЧНІ ВПЛИВИ

1.1 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. Вібрація викликає механічні напруження і деформацію як комплектуючих виробів, так і елементів конструкції РЕЗ.

Найчастіше на РЕЗ впливає вібрація, яка може виникати при транспортуванні, при роботі різних механізмів, а також при експлуатації апаратури на рухомих об'єктах.

Вібраційні навантаження викликають переважно механічні напруження і деформації виробів. Якщо деформації пружні, то їх вплив може привести 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 привести 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.

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 ЕРЕ;
- 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.

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.

Відповідно до стандарту [12] проводяться такі випробування на механічні впливи:

- метод 100 - на виявлення резонансних частот;
- метод 101 - на відсутність резонансних частот у заданому діапазоні;
- метод 102 - на вібростійкість;
- метод 103 - на віброміцність;
- метод 104 - на ударну міцність;
- метод 105 - на ударну стійкість;
- метод 106 - на вплив одиночних ударів;
- метод 107 - на вплив лінійних (відцентрових) навантажень,
- метод 108 - на вплив акустичних шумів.

1.2 Випробування на механічний резонанс

1.2.1 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 отримання синусоїдальних коливань у всьому діапазоні частот, встановленому в стандартах і ТУ на вироби та в Програмі випробувань (ПВ) для даного виду випробувань. Пристрій для визначення резонансних частот конструкції повинен забезпечувати реєстрацію зміни фази механічного коливання на 90° , 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.

1.2.2 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 1.1.

Таблиця 1.1 - Режими випробувань на наявність резонансних частот

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

Випробування проводять в діапазоні частот від 10 Гц до $1,1 f_b$, де f_b - 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 вироби 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. 1.1).

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 - $10...50 \text{ м/с}^2$ (1...5) g, при цьому частоту переходу $f_{п}$ 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 вироби і ПВ.

Швидкість зміни частоти повинна бути такою, щоб забезпечити можливість виявлення і реєстрації резонансів, і не перевищувати 1 октаву в хвилину.

Вважається, що вироби витримали випробування, якщо у них відсутні резонанси в діапазоні частот, зазначеному в стандартах і ТУ на вироби і ПВ.

1.3 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.

1.3.1 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 1.2.

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, по зміні яких можна судити про вібростійкість виробу в цілому (наприклад, рівень віброшумів, спотворення вихідного сигналу або зміна його величини, цілісність електричної мережі, нестабільність контактної опору і т.ін.).

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.

Таблиця 1.2 - Режими випробувань на вібростійкість при впливі синусоїдальної вібрації

Ступінь жорсткості	Діапазон частот, Гц	Амплітуда переміщення, мм	Частота переходу, Гц	Амплітуда прискорення, м/с 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)

1.3.2 Випробування на вібростійкість при впливі широкопasmової випадкової вібрації

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

Випробування проводять шляхом впливу широкопasmової випадкової вібрації в режимах, зазначених у таблиці 1.3.

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 виробу і в ПВ.

Таблиця 1.3 - Режими випробувань на вібростійкість при впливі широкосмугової випадкової вібрації

Ступінь жорсткості	Діапазон частот, Гц	Середнє квадратичне значення прискорення, м/с 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

1.4 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).

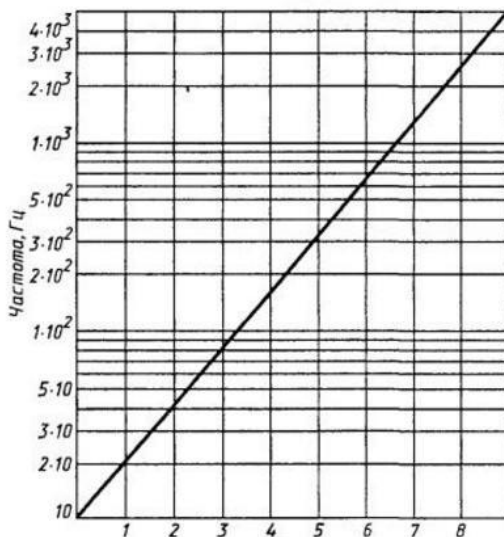
1.4.1 Випробування методом частоти, що хитається

Він включає декілька варіантів.

1.4.1.1 Метод 1а - випробування методом частоти, що хитається, у всьому діапазоні частот.

Даний 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. 1.1.



Тривалість половини циклу хитання, хв.

Рисунок 1.1 - Залежність тривалості половини циклу хитання від частоти

Час зміни частоти в діапазоні визначають за рис. 1.1, 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 1.4. Тривалість випробування визначається загальним часом впливу або розрахунковим числом циклів хитання частоти.

Таблиця 1.4 - Режими випробувань на віброміцність методом частоти, що хитається

Ступінь жорсткості	Діапазон частот, Гц	Амплітуда переміщення, мм	Частота переходу, Гц	Амплітуда прискорення, m/c^2 (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

1.4.1.2 Метод 1б - 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. 1.4, 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. 1.4.

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. 1.4.

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 1.4.

1.4.1.3 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. 1.5, від нижнього значення до верхнього і назад (цикл хитання) і підтримки постійної амплітуди прискорення.

Час зміни частоти визначають за рис. 1.1, округляючи його до найближчих значень, що забезпечуються системою управління вібраційного установкою.

Амплітуду прискорення вибирають з таблиці 1.4, а тривалість впливу вібрації, розрахунковий час циклу хитання і розрахункову кількість циклів хитання вибирають з таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 - 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

1.4.1.4 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 $0,5f_{он}$ до $1,5f_{ов}$, якщо виріб має більше однієї резонансної частоти в заданому діапазоні частот, але вище верхньої частоти заданого діапазону, де f_o - резонансна частота виробу, $f_{он}$ - нижня резонансна частота виробу; $f_{ов}$ - 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 $0,5f_0$ до $1,5f_0$, або від $0,5f_{0н}$ до $1,5f_{0в}$, що визначається за рис. 4.1,

T_0, t_0 - загальна тривалість впливу вібрації для методу 1а і розрахунковий час циклу хитання відповідно, що визначаються за таблицею 1.4 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.

1.4.1.5 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.

1.4.1.6 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 м/с^2 (20g) для ступенів жорсткості XIII-XIV;

- $1 \cdot 10^6$ коливань - для ступенів жорсткості XII і XIV при амплітуді прискорення 400 м/с^2 (40g) при кожному напрямку впливу.

Випробувальний режим встановлюють в контрольній точці за показаннями засобів вимірювання.

1.4.2 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 1.6.

Значення амплітуди переміщення, амплітуди прискорення і діапазону частот випробувань вибирають для відповідного ступеню жорсткості з таблиці 1.4.

Таблиця 1.6 - 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

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

1.4.3 Випробування шляхом впливу широкосмугової 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 широкосмугової випадкової вібрації в режимах, зазначених у табл. 1.7.

При заміні випробування на широкосмугову випадкову вібрацію випробуванням на синусоїдальну вібрацію замість ступенів жорсткості I і II використовують ступені жорсткості XI і XII з табл. 1.4 відповідно, а замість ступенів жорсткості II ті IV використовують ступінь жорсткості XIV.

Таблиця 1.7 - Режими випробувань на віброміцність шляхом впливу широкосмугової випадкової вібрації

Ступінь жорсткості випадкової вібрації	Діапазон частот, Гц	Середнє квадратичне значення прискорення, m/c^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

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

1.4.4 Обладнання для випробувань на вібраційні впливи

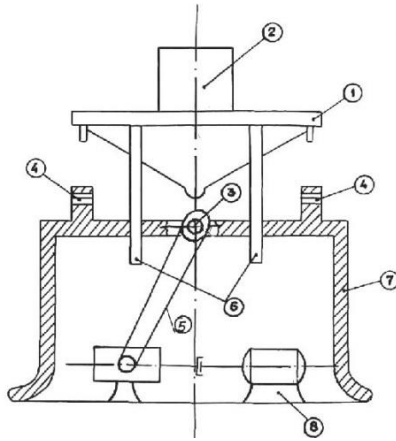
Для створення вібраційних навантажень використовуються механічні (ексцентрикові та відцентрові) і електродинамічні вібростенди.

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. 1.2.

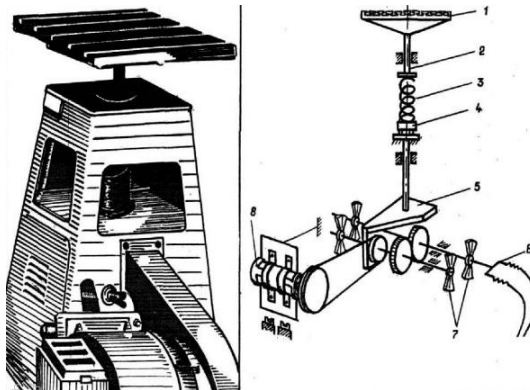
Вібрація робочого столу **відцентрового стенду** виникає під дією результуючої відцентрової сили, що утворюється при обертанні в протилежних напрямках двох валів з дисбалансами. Амплітуда коливань залежить від статичного моменту маси дисбалансів щодо їх осі обертання і частоти обертання дисбалансів,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

Зовнішній вигляд та схема вібростенда з відцентровим приводом наведені на рис. 1.3.



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

Рисунок 1.2 - Схема вібростенда ексцентрикового типу



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

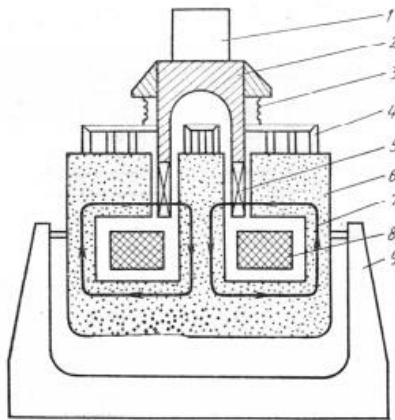
Рисунок 1.3 - Зовнішній вигляд та схема вібростенда з відцентровим приводом

Вібраційні стенди 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 вібростенда** заснований на взаємодії струму, що протікає по обмотці рухомої котушки з постійним магнітним полем електромагніту.

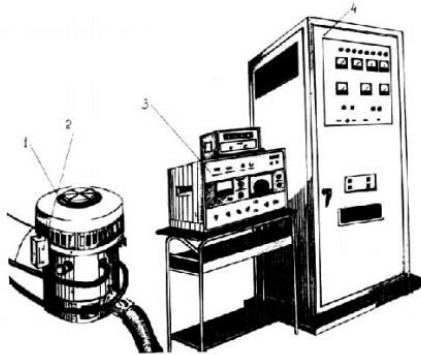
На рис. 1.4 наведена конструкція електродинамічного вібростенда, а на рис. 1.5 - зовнішній вигляд електродинамічної вібраційної установки.

Сучасні електродинамічні вібростенди 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 1.4 - Конструкція електродинамічного вібростенда



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

Рисунок 1.5 - Зовнішній вигляд електродинамічної вібраційної установки

Конструкції та основні параметри сучасних випробувальних вібраційних установок можна глянути у [19], [20].

1.5 Випробування на ударну міцність і стійкість

1.5.1 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 1.8.

Тривалість дії ударного прискорення вибирають з таблиці 1.9 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:

$$t \geq \frac{300}{f_{он}}$$

де: t - тривалість ударного прискорення, мс;

$f_{он}$ - нижча резонансна частота виробу, Гц.

Таблиця 1.8 - Режими випробувань на ударну міцність і стійкість

Ступінь жорсткості	Пікове ударне прискорення, м/с ² (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 1.9 - 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 трапеційдальний імпульс, оскільки він має найбільш широкую 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 на ударне навантаження проводять в квазірезонансному режимі збудження. Тривалість дії ударного прискорення τ вибирають в залежності від значення нижчої резонансної частоти виробу (див. табл. 1.10).

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

$$\tau \geq \frac{300}{f_{OH}}$$

де: τ - тривалість ударного імпульсу, мс;

f_{OH} - нижча резонансна частота, Гц

Таблиця 1.10 - Значення тривалості імпульсу ударного прискорення

F_{OH} , Гц	до 60	60...100	100...200	200...500	500...1000	більш 1000
τ , мс	18 ± 5	11 ± 4	6 ± 2	3 ± 1	$2 \pm 0,5$	$1 \pm 0,3$

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.

1.5.2 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 1.9.

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 контактної опору і т.д.).

При суміщенні випробування на ударну стійкість з випробуванням на ударну міцність кількість ударів повинна відповідати зазначеній в таблиці 1.8. Контроль параметрів виробів проводять в кінці випробування на ударну міцність при впливі не менше 20 ударів для кожного напрямку дії.

1.5.3 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 1.11.

Значення тривалості дії ударного прискорення з напівсинусоїдальною формою - імпульсу ударного прискорення - вибирають в залежності від нижчих резонансних частот виробів з таблиці 1.12 для ступенів жорсткості IV і вище, а для ступенів жорсткості I-III тривалість дії ударного прискорення вибирають з таблиці 1.9.

Таблиця 1.11 - Режими випробувань на одиночний удар

Ступінь жорсткості	Пікове ударне прискорення, m/c^2 (g)	Ступінь жорсткості	Пікове ударне прискорення, m/c^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)		

Таблиця 1.12 - Тривалість дії ударного прискорення при випробуванні на одиночний удар

Значення нижчих резонансних частот виробів, Гц	Тривалість дії ударного прискорення, мс
500 і вище	3 ± 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	$0,05 \pm 0,02$

Вироби, нижча резонансна частота яких перевищує 2000 Гц, допускається випробувати при ударних прискореннях 5000, 10000 і 15000 м/с² (500, 1000 і 1500 g) при тривалості дії ударного прискорення 1,5; 1,0 та 0,5 м/с² відповідно.

Електричні вироби з масою більше 2 кг допускається випробувати при прискоренні 10000 м/с² (1000 g). При цьому тривалість дії і форму імпульсу ударного прискорення не контролюють.

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

Тривалість дії ударного прискорення τ для ударного прискорення з трапецієдальною та пилкоподібною формами імпульсу вибирають відповідно за формулами:

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

$$\tau_{\Pi} = \frac{300}{f_{он}}$$

де значення n_i вибирають в діапазоні від 3 до 100;

$f_{он}$ - значення найнижчої резонансної частоти виробу, Гц.

Отримані за цими формулами значення τ округлюють (в будь-яку сторону) до найближчих значень за таблицями 1.9 та 1.12.

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 напрямки 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.

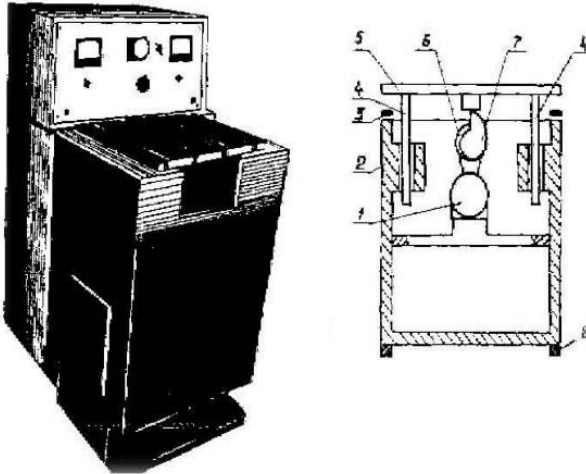
1.5.4 Обладнання для випробувань на ударні впливи

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. 1.6).

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.



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

Рисунок 1.6 - Схема стенда для випробувань на вплив багаторазових ударів

Електродинамічна ударна установка (рис. 1.7) 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.

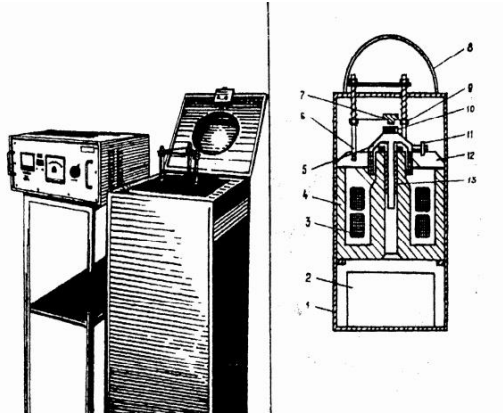
Сила, що виникає при цьому, визначається за формулою:

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

де B - індукція в повітряному зазорі магнітного ланцюга вібратора;

L - довжина провідника рухомої котушки;

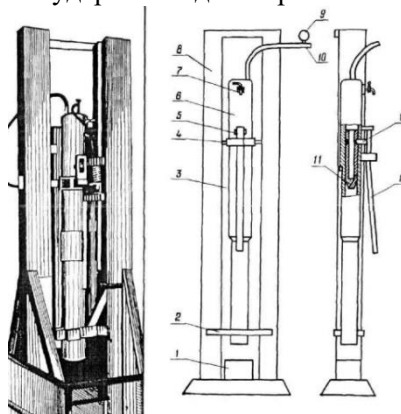
I - ефективне значення сили струму в рухомій котушці.



1 - 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 1.7 - Електродинамічна ударна установка

При випробуваннях на вплив одиночних ударів з великим прискоренням використовуються **пневматичні ударні установки** (див. рис. 1.8), 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 1.8 - 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.

Конструкції та основні параметри сучасних випробувальних ударних установок можна глянути у [19].

1.6 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 1.13.

Таблиця 1.13 - Режими випробувань на лінійне прискорення

Степінь жорсткості	Лінійне прискорення, м/с ² (g)	Степінь жорсткості	Лінійне прискорення, м/с ² (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)

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

Час розгону або гальмування центрифуги τ_L в секунду повинен задовольняти умовам:

$$\tau_L \geq 0,3 \cdot \sqrt{\frac{R}{j}};$$

або:

$$\tau_L \geq \frac{100}{n}$$

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 м/с² (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.

Конструкції та основні параметри сучасних центрифуг та поворотних столів можна глянути у [19].

1.7 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.

1.7.1 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. 1.9.

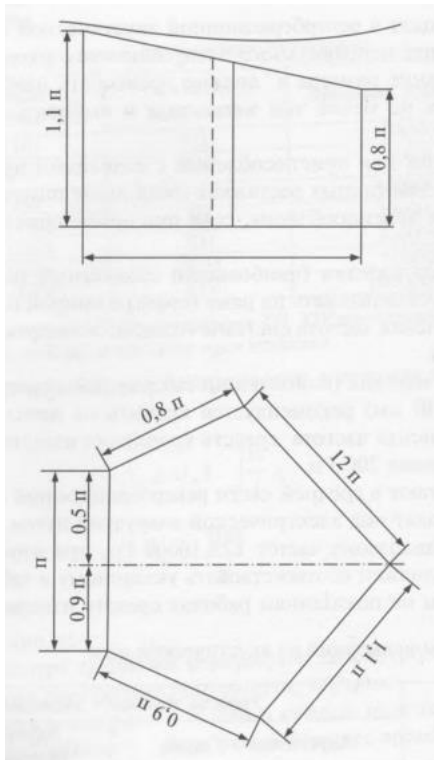


Рисунок 1.9 - Схема ревербераційної камери

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 і т.п.).

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 1.14 з допустимим відхиленням за показаннями робочих засобів вимірювань ± 3 дБ.

Рівні звукового тиску, виміряні в третьоктавних смугах частот, а також допустимі відхилення повинні відповідати вказаним у табл. 1.14 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.

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.).

Таблиця 1.14 - 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

1.7.2 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 1.14 (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.

2 ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА КЛІМАТИЧНІ ВПЛИВИ

2.1 Впливи кліматичних факторів на РЕЗ

В процесі експлуатації і зберігання РЕЗ піддається впливу довколишнього середовища.

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°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°C при швидкості зміни температури до 50°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).

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 обкладин.

Волога інтенсивно впливає на опір резисторів різних типів і конструкцій.

Періодична дія вологи на тонкошарові плівкові резистори типу ПС або МЛТ 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.

Відповідно до стандарту [12] проводяться такі випробування на кліматичні впливи:

- метод 201 - на вплив підвищеної робочої температури;
- метод 202 - на вплив підвищеної граничної температури;
- метод 203 - на вплив зниженої робочої температури;
- метод 204 - на вплив зниженої граничної температури;
- метод 205 - на вплив зміни температури середовища;
- метод 206 - на вплив інею та роси;
- метод 207 - на вплив підвищеної вологості, тривалі або прискорені;
- метод 208 - на вплив підвищеної вологості, короточасні;
- метод 209 - на вплив зниженого атмосферного тиску;
- метод 210 - на вплив підвищеного атмосферного тиску;
- метод 211 - на вплив сонячного випромінювання;
- метод 212 - на вплив динамічного пилу (піску);
- метод 213 - на вплив статичного пилу (піску);
- метод 215 - на вплив соляного туману;
- метод 216 - на вплив статичного гідравлічного тиску;

- метод 217 - на водонепроникненість;
- метод 218 - на вплив дощу;
- метод 219 - на краплезахищеність;
- метод 220 - на водозахищеність.

2.12 Випробування на температурні впливи

2.2.1 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 виділеної потужності 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. 2.1).

Таблиця 2.1 - Ступені жорсткості випробувань на підвищені температури

Ступінь жорсткості	I	IV	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Температура, °C	40	50	70	85	100	125	155	200	250	315

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.

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 разі, 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 неможливо, то допускається вилучення виробу з камери для вимірювання; однак при

цьому час вимірювання не повинен перевищувати 3 хв., якщо інше значення часу спеціально не обумовлено в ТУ.

Для випробувань на підвищені температури застосовують спеціальні камери тепла.

2.2.2 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 2.2).

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 2.2 - 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.

2.2.3 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:

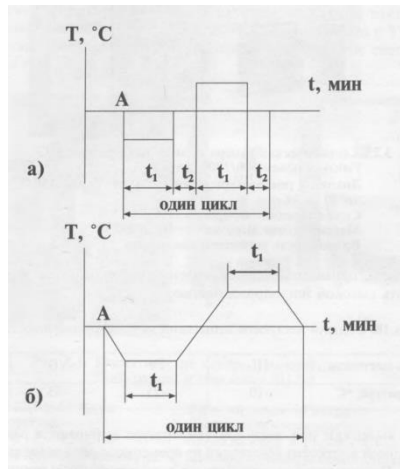
- метод двох камер;
- метод однієї камери;
- метод дворідинних ванн;
- комбінований метод.

2.2.3.1 За методом двох камер (швидка зміна температури) випробування проводять в камерах тепла і холоду без подачі на вироби 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. 2.1а).



а) при випробуванні методом двох камер;

б) при випробуванні методом однієї камери;

A - початок циклу, t_1 - час витримки, t_2 - час перенесення.

Рисунок 2.1 - Графіки зміни температури одного циклу

2.2.3.2 За методом однієї камери (поступова зміна температури) випробування проводять без подачі на вироби 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 2.1б).

2.2.3.3 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.

2.2.3.4 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.

Вважається, що вироби витримали випробування, якщо вони задовольняють вимогам, заданим в ПВ або ТУ.

2.2.4 Обладнання 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 ϵ 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 металевій 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.

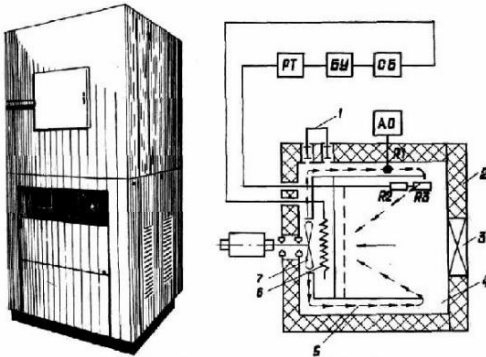
Непрямий спосіб охолодження заснований на властивості рідини при випаровуванні поглинати тепло з навколишнього середовища. Технічна реалізація даного способу заснована на застосуванні компресійної випарювальної системи, в одній частині якої газоподібний холодоагент (фреон) стискається до тиску, що забезпечує 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 термомпари або терморезистори.

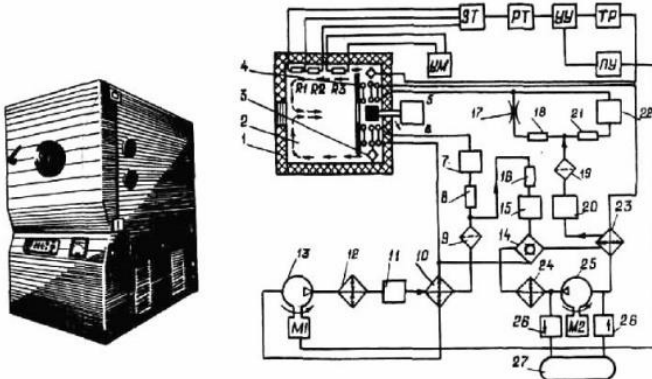
Розміщення датчиків контролю температури при випробуванні виробів, що розсіюють тепло, повинно враховувати можливість виключення взаємовпливу виробів один на одного з тим, щоб при встановленні температурного режиму вихідні вимірювальні прилади показували справжню температуру.

Зовнішній вигляд камер і їх схематичне зображення, яке пояснює принцип роботи, показані на рис. 2.2, 2.3, 2.4.



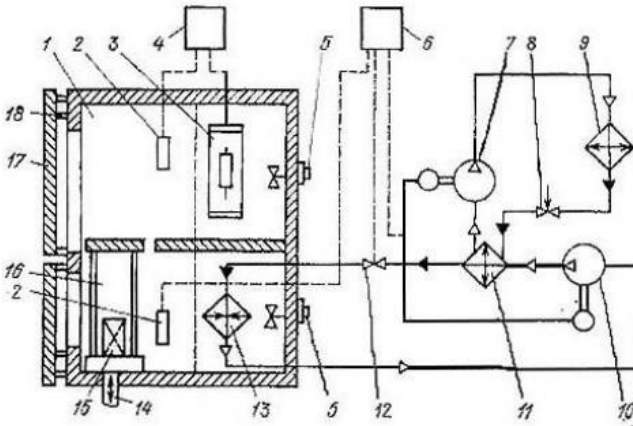
1 - засувка; 2 - двері; 3 - вікно; 4 - корисний об'єм; 5 - повітряпровід;
6 - нагрівач; 7 - вентилятор; РТ - регулятор температури; БУ - блок керування; СБ - силовий блок; АО - блок аварійного відключення

Рисунок 2.2 - 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; БУ - пристрій керування; ТР - тиристорний регулятор; ПУ - пусковий пристрій; УМ - рівноважуючий міст

Рисунок 2.3 - Камера тепла і холоду КТХ-0,4-65/155



1 - камера тепла; 2 - датчики температури; 3 - електронагрівач; 4 - регулятор температури камери тепла; 5 - вісьовий 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 2.4 - Схема обладнання для випробувань на циклічний вплив температури

Конструкції та основні параметри сучасних термокамер та систем для температурних випробувань і термоцикування можна глянути у [19].

2.3 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.

2.3.1 Випробування без конденсації вологи - безперервний режим

У безперервному режимі випробувань не передбачається конденсації вологи на виробах, тому безперервні випробування проводять при постійних значеннях температури і вологості в камері.

Вироби поміщають в камеру вологості і витримують при температурі, зазначеній в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - 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

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.

2.3.2 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. 2.4.

Таблиця 2.4 - 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 короточасних випробувань на вологостійкість при циклічному режимі вироби 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.

2.3.2.1 Циклічний режим 16 + 8 годин

Випробування проводять без електричного навантаження. Вироби піддають дії безперервно послідовно діючих один за одним циклів (рис. 2.5).

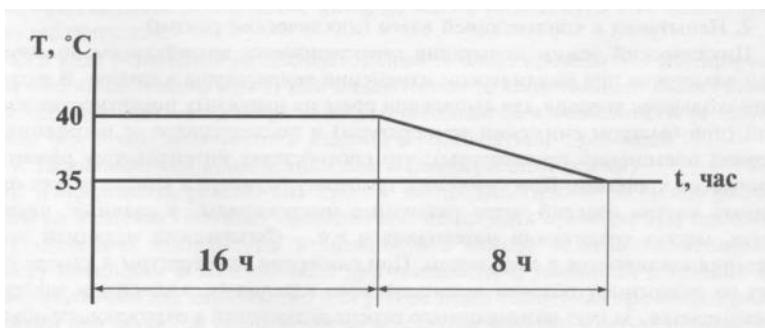


Рисунок 2.5 - Етапи кожного циклу (16+8 год.) при випробуванні на підвищену вологість

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 2.5.

У другій частині циклу виріб в камері охолоджують протягом 8 годин до температури не менше ніж на 5°C нижче зазначеної на рис 2.5. Відносна вологість при цьому повинна бути $(94\dots 100)\%$.

2.3.2.2 Циклічний режим 12 + 12 годин

Випробування проводять у камері вологи, яка повинна підтримувати випробувальний режим з відхиленнями, що не перевищують зазначені на рис. 2.6.

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 вироби і ПВ і вибирають з табл. 2.5.

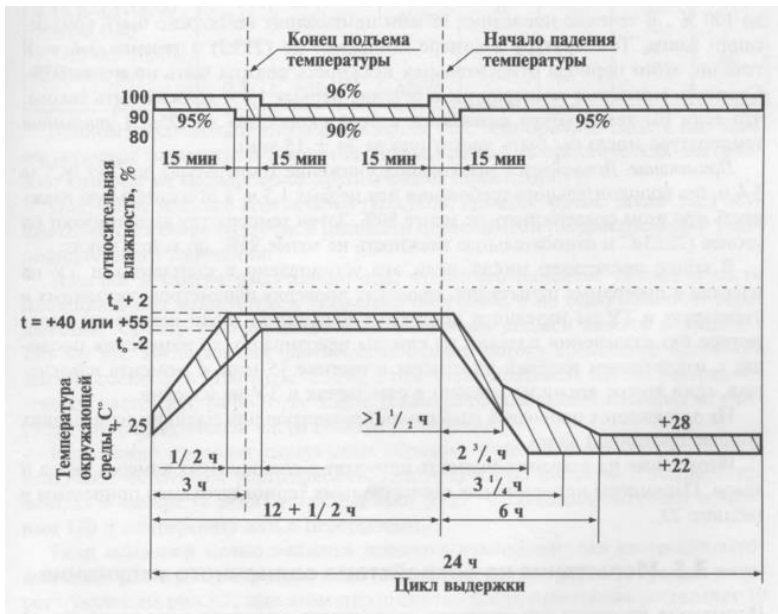


Рисунок 2.6 - Етапи кожного циклу (12 + 12 год.) при випробуванні на підвищену вологість

Підвищення температури і вологості при проведенні кожного циклу має бути досить швидким, щоб забезпечити конденсацію вологи (випадання роси) на виробах.

У камері встановлюють температуру $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ і відносну вологість не менше 95%. Температуру в камері підвищують до температури зазначеної в табл. 2.5 протягом $(3 \pm 0,5)$ 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 виробах в цей період повинен утворитися конденсат.

Таблиця 2.5 - 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

У камері підтримують температуру, зазначену в табл. 2.5 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 виробах 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 відносну вологість при цьому підтримувати не менше 80%. Потім температуру витримують на рівні (25±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.

2.3.3 Обладнання для випробувань на підвищену вологість

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 $40...70^\circ\text{C}$ потрібна точність регулювання за сухим термометром $\pm 0,3^\circ\text{C}$, а за вологим до $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

Для забезпечення необхідної вологості повітря в випробувальних камерах застосовується ряд способів (див. рис. 2.7).

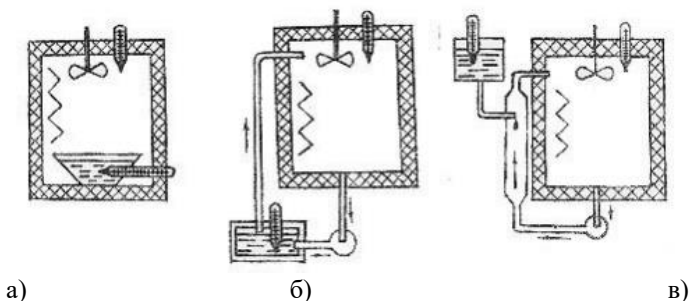


Рисунок 2.7 - Способи зволоження повітря

Найпростішим є відкритий спосіб (рис. 2.7а), що відтворює природні умови зволоження.

Його недоліком є труднощі підтримки необхідного режиму.

Характерною особливістю закритих способів зволоження є рециркуляція повітря з робочого об'єму камери через зволожувальний пристрій (зволожувач). В зволожувачі повітря або продувається через шар підігрітої води (рис. 2.7б), або змішується з розпорошеною водою (рис. 2.7в).

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.

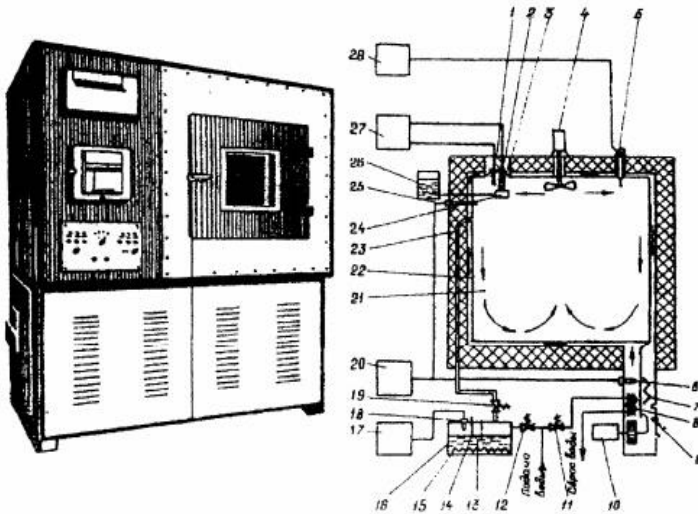
Для вимірювання вологості повітря в випробувальних камерах застосовують гігрометри, в яких використовується психрометричний або сорбційний метод вимірювання вологості.

Психрометричний метод заснований на принципі порівняння температури повітря і температури тіла, з поверхні якого відбувається випаровування води.

Сорбційний метод заснований на використанні гігроскопічних тіл, властивості яких змінюються в залежності від кількості поглиненої вологи. Залежно від властивості матеріалу, використаного для вимірювання, розрізняють деформаційні, вагові, колірні і інші сорбційні гігрометри.

У системах автоматичного регулювання температури і вологості у якості датчиків найбільш часто використовуються ртутні контактні термометри, терморезистори, термопари і деформаційні гігрометри.

Зовнішній вигляд і схема камери тепла і вологи КВТ-0,4-155 наведені на рис. 2.8.



1 - сухий 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 вентилялі; 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 2.8 - Зовнішній вигляд і схема камери тепла і вологи КВТ-0,4-155

Конструкції та основні параметри сучасних камер тепла та вологи можна глянути у [19].

2.4 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 мінус 20 ± 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.

2.5 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 ± 2 °С, 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 / м³.

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.

Конструкції та основні параметри сучасних камер соляного туману можна глянути у [19].

2.6 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 - при впливі дощу, що падає під кутом не більше 60° до вертикалі;
- В2 - при впливі бризок води, що падають в будь-якому напрямку;
- В3 - при впливі струменів води, що падають в будь-якому напрямку;
- В4 - при повному зануренні у воду.

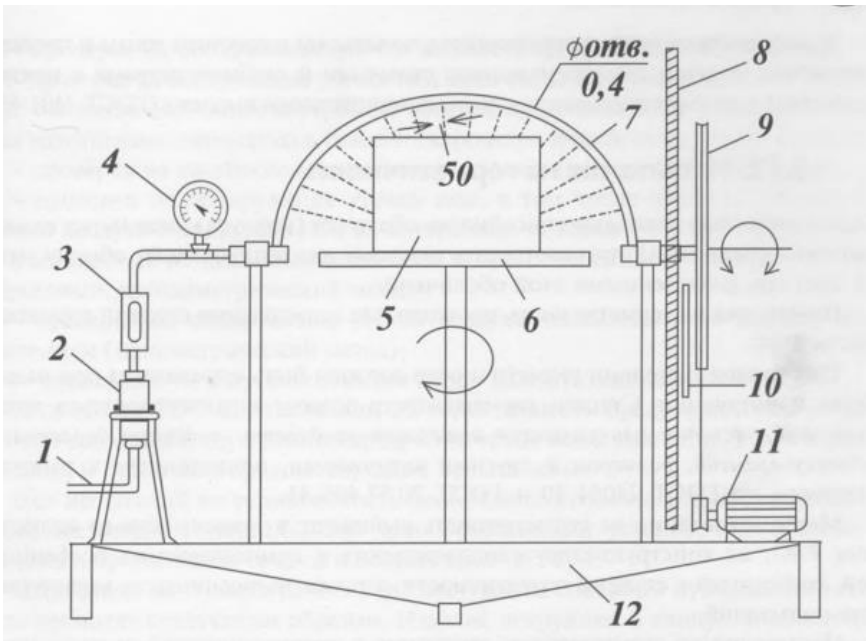
Випробування виробів виконання В1 проводять на випробувальній установці (рис. 2.9) шляхом подачі на виріб води, що проходить через отвори в трубці, яка хитається (7).

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° від вертикалі в обох напрямках зі швидкістю 1,05 рад/с (60° 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/м².

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 2.9 - 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° 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° 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.

2.7 Випробування на вплив тиску - атмосферного та гідростатичного

2.7.1 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 нетепловіділяючих виробів, а також для випробування тепловіділяючих виробів, для яких нагрів при електричному навантаженні, нормованому для зниженого атмосферного тиску, не є критичним.

Для забезпечення відтворюваності результатів випробувань тепловіділяючих 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 мінімально допустимі відстані між виробами в термобарокамері встановлюють в стандартах, ТУ на вироби і ПВ. Визначення мінімально допустимих відстаней між тепловіділяючими 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.

2.7.2 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].

Конструкції та основні параметри сучасних баро- та термобарокамер можна глянути у [19].

2.7.3 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 граничній глибині 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.

2.8 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.

2.8.1 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 гратчастому 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 опромінюють ультрафіолетовим світлом, щоб встановити проникненість пилу у виріб. При цьому рекомендується користуватися лампами ультрафіолетового випромінювання типу ПРК зі світлофільтрами марки УФС.

2.8.2 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.

2.9 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°) 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° 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.

2.10 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. 2.10, при цьому тривалість випробування становить 10 циклів.

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.

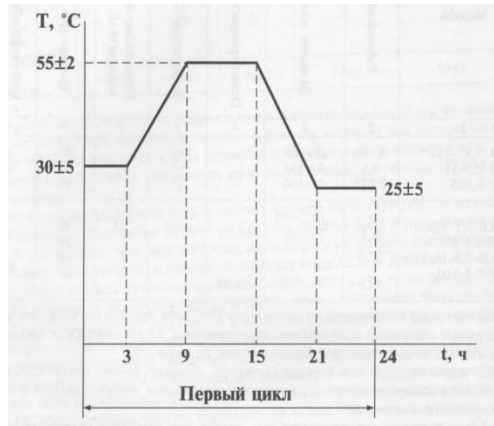


Рисунок 2.10 - Режим випробування на вплив сонячної радіації

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.

2.11 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

компонувальних 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 зниженим тиском і при підвищеній температурі (бульбашковий, катодометричний метод);

- перевірка на виявлення витоку 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.

3 ВИПРОБУВАННЯ РЕЗ НА БІОЛОГІЧНІ ВПЛИВИ

Випробування на біостійкість проводять з метою визначення здатності РЕЗ зберігати в умовах впливу біологічних факторів значення показників в межах, встановлених в НТД.

Біологічні зовнішні обурюючі 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. Найбільші руйнування РЕЗ виникають під дією грибкової цвілі.

3.1 Випробування на вплив цвілевих грибів (метод 214)

Грибостійкістю називають здатність РЕЗ протистояти розвитку і руйнівній дії грибкової цвілі в середовищі.

Випробування проводять для визначення здатності виробів або їх окремих блоків і складальних одиниць протистояти розвитку грибкової 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 грибноутворення або в ексикатори. 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.

3.2 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 мілью оцінюють за втраченою ними масою.

3.3 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 дресування 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).

4 СПЕЦІАЛЬНІ ВИДИ ВИПРОБУВАНЬ РЕЗ

4.1 Випробування 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. 4.1.

Випробування проводять у такий спосіб.

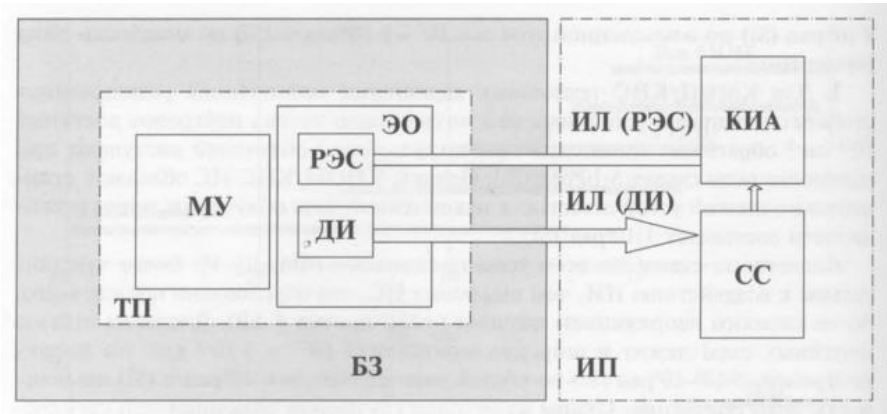
Об'єкт випробувань розміщують в експериментальному об'ємі технологічного приміщення (ТП), в якому розташовується моделююча установка. Біологічний захист необхідний для локалізації модельованих іонізуючих випромінювань усередині технологічного приміщення і забезпечення безпеки персоналу та контрольно-вимірювальної 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.



МУ - моделююча установка; ТП - технологічне приміщення; ЭО - експериментальний об'єкт; 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 4.1 - Блок-схема організації дистанційних вимірювань при проведенні випробувань РЕЗ на МУ

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.

4.2 Спеціальні космічні випробування

4.2.1 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° до 160°) 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 тілісного 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.

4.2.2 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) вироби 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 вироби і реєструюча апаратура знаходяться у вакуумі. Перед скиданням виріб тривалий час може знаходитися в стані спокою, що буває важливо для "заспокоєння" рідких теплоносіїв.

4.2.3 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 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.

4.2.4 Комплексні космічні випробування

Матеріали і блоки РЕЗ, що працюють в космічних умовах, бажано піддавати комплексному впливу факторів.

На рис. 4.2 приведена схема установки, яка дозволяє проводити випробування при спільній або роздільній дії факторів космічного простору.

До її складу входять:

- 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

Об'єм камери дорівнює $0,3 \text{ м}^3$, вакуум створюється до $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$, температура змінюється від -150 до $+200 \text{ }^\circ \text{C}$.

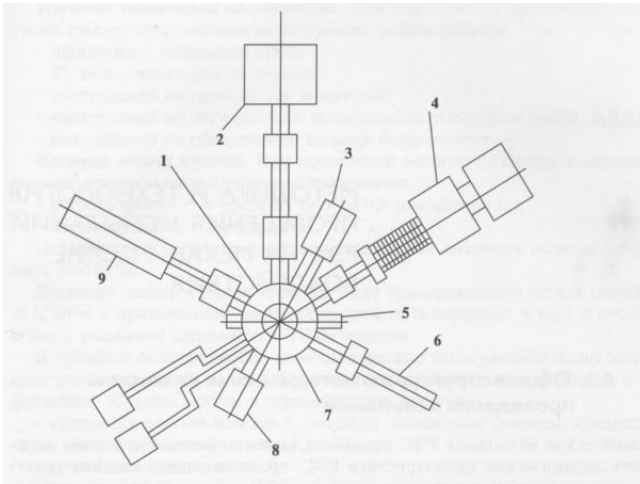


Рисунок 4.2 - Схема установки для проведення випробувань при спільній або роздільній дії факторів космічного простору

5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ РЕЗ

В 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.

5.1 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 суперелементов (підконструкцій), модальний синтез і макромову DMAP для створення призначених для користувача додатків.

Однак цій системі притамана 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.

5.2 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 термомеханических 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.

5.3 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 відчизняних 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.

5.4 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.

5.5 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 незамортизованих 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.

5.6 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 воздуховодів 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.

5.7 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 її 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.

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

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

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

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

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

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

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

9 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.

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

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

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

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

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

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

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

17 Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: Учеб. пособие для вузов /О.П. Глудкин, А.Н. Енгальчев, А.И. Коробив, Ю.В. Трегубов; Под ред. А.И. Коробова.-М.: Радио и связь, 1987. - 272 с.: ил.

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

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

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