

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет



КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

“Зовнішні впливи на електронні апарати та засоби захисту”

для студентів спеціальності

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

2018

Конспект лекцій з дисципліни "Зовнішні впливи на електронні апарати та засоби захисту" для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми «Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Поспеева І.Є., Шило Г.М. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 82 с.

Укладачі: Поспеева Ірина Євгенівна, ст. викладач;
Шило Галина Миколаївна, доцент.

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

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

Розглянуто
на засіданні кафедри ІТЕЗ
протокол № 11 від 02.06.17 р.

Затверджено
на засіданні НМК ФРЕТ
протокол № 10 від 22.06.17 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. ВИДИ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ	6
1.1 Внутрішні фактори	6
1.2 Зовнішні фактори	7
1.3 Механічні ЗВФ	7
1.4 Кліматичні та термічні ЗВФ	9
1.5 Біологічні ЗВФ	10
1.6 Інші ЗВФ	10
1.7 Вплив ЗВФ на РЕЗ	11
2. МЕХАНІЧНІ ВПЛИВИ НА РЕЗ. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ	13
2.1 Види механічних впливів	13
2.2 Основні поняття та терміни.....	16
2.2.1 Поняття вібро (ударо) стійкості та вібро (ударо) міцності	16
2.2.2 Поняття жорсткості та механічної міцності конструкції.....	16
2.3 Джерела механічних впливів на РЕЗ.....	17
3. ДІНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗ ПРИ ВІБРАЦІЙНОМУ ВПЛИВІ	19
3.1 Конструкція РЕЗ як коливальна система.....	19
3.2 Коливання системи з одним ступенем вільності.....	20
3.3 Явище резонансу	24
3.4 Параметри та характеристики періодичних вібрацій.....	27
3.4.1. Параметри гармонійних коливань	27
3.4.2 Параметри випадкових коливань.....	28
3.5 Вібрації зі змінними параметрами	29
3.5.1 Вимушені вібрації зі змінними параметрами	29
3.5.2 Метод хитної частоти. Метод змінних амплітуд	30
3.5.3 Биття	32
4. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ НА РЕА ТА ЇЇ ЕЛЕМЕНТИ	33
4.1 Характерні особливості дії вібрацій на конструкцію РЕА та її елементи	33
4.2 Дія вібрацій на стаціонарну РЕА.....	35
4.3 Дія вібрацій на РЕА, що встановлюється на рухомі об'єкти.....	36
4.4 Вплив вібрацій на функціонування РЕА	37
5. АНАЛІЗ ВПЛИВУ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РЕА ТА ЇЇ ЕЛЕМЕНТИ	39
5.1 Поняття удару. Характеристики удару	39
5.2 Швидкісний удар.....	42
5.3 Імпульсний удар	42

6. КОНСТРУКТИВНІ МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ДІЇ ВІБРАЦІЙ ТА УДАРІВ.....	46
6.1 Вимоги до механічних характеристик РЕА	46
6.2 Віброміцні конструкції кріплення вузлів РЕА	47
6.3 Віброміцні шасі та каркаси.....	48
6.3.1 Штамповані шасі.....	48
6.3.2 Литі шасі	49
6.3.3 Каркаси	49
6.3.4 Конструктивні методи ослаблення дії вібрацій.....	50
6.4 Амортизатори	50
6.4.1 Гумово-металеві амортизатори	51
6.4.2 Амортизатори рівночастотні демпфірованого типу АД.....	53
6.4.3 Амортизатори з фрикційним демпфіруванням типу АФД.....	53
6.4.4 Амортизатори просторового навантаження типу АПН	53
6.4.5 Суцільнометалеві амортизатори з матеріалу МР.....	54
6.4.6 Середньочастотні амортизатори пелюсткового типу	56
6.4.7 Тросові амортизатори.....	57
6.4.8 Пружинні амортизатори	57
6.4.9 Комбіновані амортизатори.....	58
7. ТЕМПЕРАТУРНІ ВПЛИВИ НА РЕА	59
7.1 Поняття теплового режиму	59
7.2 Вплив підвищених температур.....	60
7.3 Вплив знижених температур.....	61
7.4 Тепловий удар.....	61
8. КЛІМАТИЧНІ ВПЛИВИ НА РЕА.....	63
8.1 Вологість.....	63
8.1.1 Вплив вологості на працездатність РЕА.....	63
8.1.2 Захист РЕА від підвищеної вологості. Захисні покриття	66
8.1.3 Герметизація	68
8.2 Атмосферний тиск	72
8.3 Пил та пісок.....	73
9. РАДІАЦІЙНІ ТА БІОЛОГІЧНІ ВПЛИВИ НА РЕА	76
9.1 Радіаційні впливи	76
9.1.1 Електромагнітне та іонізуюче випромінювання	76
9.1.2 Сонячна та космічна радіація.....	78
9.2 Біологічні фактори	79
9.2.1 Цвіль	79
9.2.2 Комахи	80
9.2.3 Гризуни	81
9.2.4 Засоби захисту від біологічних факторів.....	81
ЛІТЕРАТУРА	82

ВСТУП

Будь-технічний об'єкт (ТО) передбачається експлуатувати в конкретних умовах, які визначаються станом навколишнього середовища і, відповідно, сукупністю зовнішніх впливових факторів, (ЗВФ), велика частина яких діє на цей об'єкт дестабілізуюче.

Врахування впливу цих факторів і пошук рішень щодо захисту від них є одним з найважливіших етапів процесу проектування будь-якої техніки, в тому числі і радіоелектронних засобів (РЕЗ). Для останніх це є найбільш важливим, оскільки дестабілізуючий вплив багатьох ЗВФ на радіоапаратуру в цілому і її компоненти є особливо жорстким і часто може приводити до порушення роботи апаратури, тимчасового або остаточного виходу її з ладу, а також часткового або повного руйнування.

Щоб уникнути цього, слід заздалегідь, на етапі проектування, визначити найбільш повний склад ЗВФ, які будуть впливати на даний РЕЗ в процесі його експлуатації, а також транспортування і зберігання, та передбачити заходи щодо захисту від них шляхом вибору відповідних матеріалів, покриттів, способів компонування, методів з'єднань, використання різних захисних засобів і інших конструктивних рішень.

З цією метою, перш за все, необхідно класифікувати виріб, що розробляється, визначивши його клас, групу і підгрупу використання, а також групу, яка визначається категорією розміщення. Ця класифікація проводиться на підставі відповідних стандартів, серед яких основними є ГОСТ 15150-69, а також ГОСТ 11474-88 для побутової апаратури або ГОСТ 16019-78 для професійної апаратури. Дана класифікація вивчається в рамках дисципліни "Основи проектування ЕА".

Метою дисципліни "Зовнішні впливи і захист РЕЗ" є вивчення процесів, що протікають в конструкціях РЕЗ під впливом різних ЗВФ, методів проведення інженерних розрахунків конструкцій, а також пошук і обґрунтування ефективних заходів захисту.

1. ВИДИ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ

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

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

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

1.1 Внутрішні фактори

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

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

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

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

1.2 Зовнішні фактори

Відповідний ГОСТ ділить усі зовнішні впливові фактори (ЗВФ) на наступні класи: механічні, кліматичні, біологічні, радіаційні, електромагнітні, спеціальних середовищ і термічні.

У свою чергу кожен клас поділяється на групи, а кожна група на види, яким відповідають певні види випробувань. Наприклад, клас кліматичних впливів ділиться на групи:

- атмосферний тиск;
- температура середовища;
- вологість повітря або інших газів та ін.

Групи в свою чергу поділяються на такі види:

- атмосферний підвищений або понижений тиск;
- підвищена і, відповідно, знижена температура середовища;
- зміна температури середовища та ін.

Одна з можливих класифікацій ЗВФ приведена на рисунку 1.1.

Для механічних ЗВФ вводиться ще одна градація - підгрупа.

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

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

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

1.3 Механічні ЗВФ

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

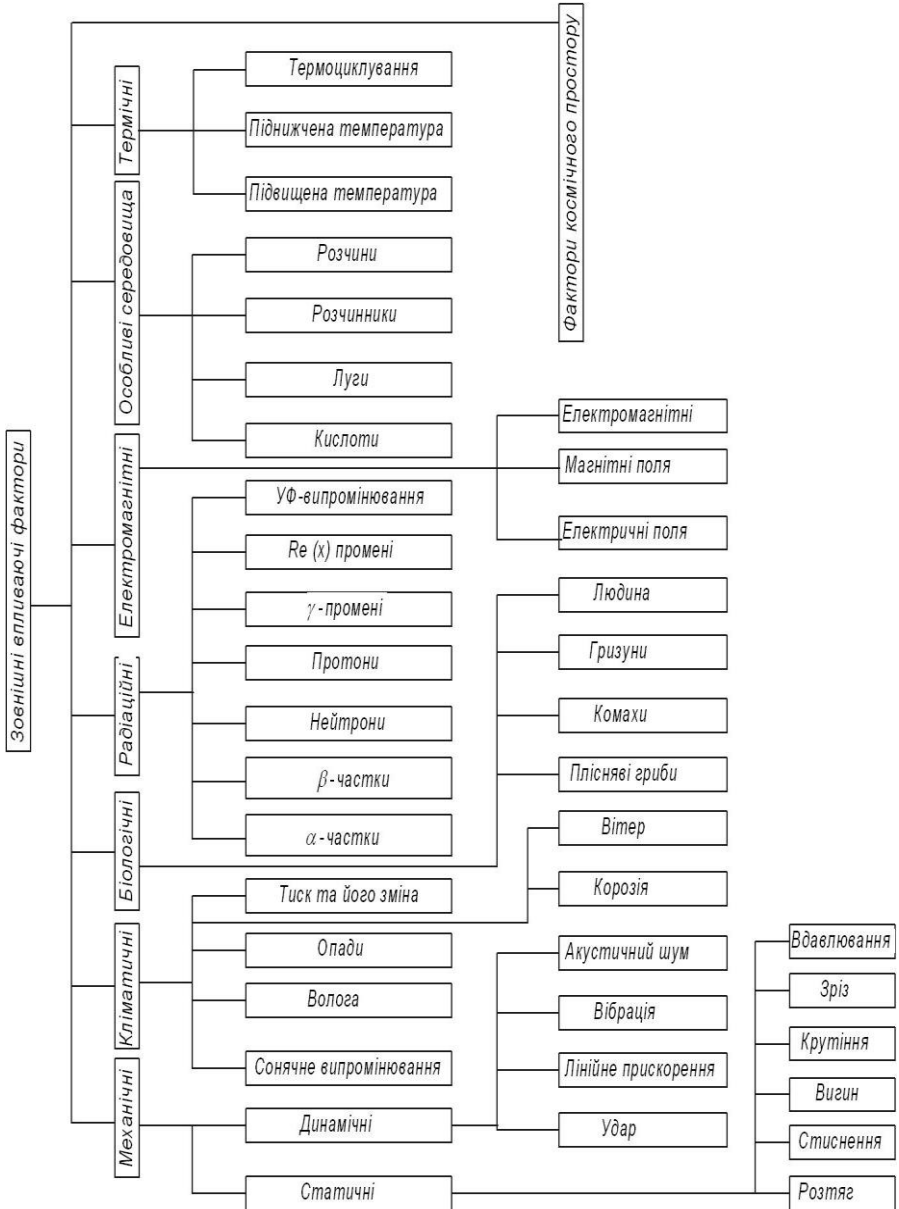


Рисунок 1.1 - Класифікація ЗВФ

До **факторів статичного впливу** відносяться такі види:

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

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

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

1.4 Кліматичні та термічні ЗВФ

Серед **кліматичних факторів** зазвичай виділяють впливи:

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

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

Термічні впливи в деяких випадках розглядаються як частина кліматичних впливів, а в інших виділяються в окремий клас. До них відносять вплив підвищеної, зниженої температури, її періодичні (термоциклування) і неперіодичні зміни.

1.5 Біологічні ЗВФ

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

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

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

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

1.6 Інші ЗВФ

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

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

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

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

- відбитого планетою Сонячного випромінювання;
- власного теплового випромінювання планети;
- Галактичних космічних випромінювань;
- потоків міжпланетної пилу і метеорних частинок;
- магнітного поля планети;
- замороженого магнітного поля «Сонячного вітру»;
- та ін..

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

1.7 Вплив ЗВФ на РЕЗ

Дія зовнішніх і внутрішніх факторів *на матеріали виробів* проявляється в основному шляхом наступних механізмів впливу:

- адсорбционного;
- дифузійного;
- хімічного;
- корозійного;
- радіаційного.

Фізико-хімічні процеси, що відбуваються при цьому, призводять до зміни значень параметрів і характеристик матеріалів і виробів, та в ряді випадків викликають відмови.

Можливі зміни **незворотні і зворотні**. Прикладами **незворотних змін** є корозія металів, зміна структури матеріалів при інтенсивному радіоактивному опроміненні та ін. До **зворотніх змін** відносяться такі, як відновлення властивостей матеріалу, що адсорбував гази або вологу своєю поверхнею; відновлення властивостей, значень параметрів і характеристик виробів після припинення температурних впливів та ін.

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

Фізико-хімічні процеси, що виникають в матеріалах, можуть відбуватися у об'ємі і на поверхні виробів, в електричних ланцюгах, в

рухомих і нерухомих з'єднаннях. Причиною, яка призводить до появи зазначених процесів, є вплив зовнішньої енергії, що перетворюється при цьому з одного виду в інший.

Найбільш часто на виробі впливають такі види енергії:

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

Кожному виду енергії відповідає певний характер взаємодії між частинками в відповідних енергетичних полях. Під дією енергії одного або декількох видів у виробах виникають фізико-хімічні процеси, які можуть призводити до відмов. Найбільш поширені такі причини виникнення відмов:

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

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

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

2. МЕХАНІЧНІ ВПЛИВИ НА РЕЗ. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ

2.1 Види механічних впливів

Всі види радіоелектронної апаратури (РЕА) піддаються впливу зовнішніх механічних навантажень (вібрації, удари, прискорення, акустичні шуми), які передаються до кожної деталі, що входить в конструкцію.

Механічні впливи мають місце в працюючій РЕА, якщо вона встановлена на рухомому об'єкті, або тільки при транспортуванні її в неробочому стані, як у випадку стаціонарної та деяких видів возимої РЕА. Кількість переданої енергії визначає рівень і характер змін конструкції. Допустимі рівні механічних змін конструкції визначаються її **міцністю і стійкістю** до механічних впливів.

Під **міцністю конструкції** розуміється здатність апаратури виконувати функції і зберігати параметри після дії механічних впливів.

Стійкість конструкції - здатність РЕА зберігати функції і параметри в процесі механічних впливів.

Відгуком, або реакцією конструкції на механічні дії називають трансформацію і перетворення енергії механічного збудження. До них відносяться механічні напруги в елементах конструкції, переміщення елементів конструкції і їх зіткнення, деформації та руйнування конструктивних елементів, зміни властивостей і параметрів конструкції.

Механічні дії можуть призводити до взаємних переміщень деталей і вузлів, деформації кріпильних, несучих та інших елементів конструкцій, їх зіткнення. При незначних механічних впливах в елементах конструкцій виникають пружні деформації, що не позначаються на працездатності апаратури. Збільшення навантаження призводить до появи залишкової деформації і при певних умовах руйнування конструкції. Руйнування може наступити і при навантаженнях, багато менших граничних значень статичної міцності матеріалів, якщо конструкція виявиться схильною до знакозмінних навантажень.

Відмови апаратури бувають **відновлюваними** після зняття або

ослаблення механічної дії (зміна параметрів компонентів, виникнення електричних шумів) і **невідновлюваними** (обриви і замикання електричних з'єднань, відшаровування провідників друкованих плат, порушення елементів кріплення і руйнування несучих конструкцій).

На РЕА, що транспортується, в процесі її експлуатації впливають:

- вібрації;
- ударні навантаження;
- лінійні прискорення (перевантаження);
- акустичні шуми.

Під **вібрацією** розуміють механічні коливання елементів РЕА або її конструкції в цілому.

Вібрації бувають **періодичними і випадковими**.

Періодична вібрація буває **гармонійною і полігармонійною**.

Гармонійна вібрація характеризуються частотою, амплітудою, прискоренням.

Полігармонійна вібрація може бути представлена у вигляді суми гармонійних вібрацій. Полігармонійні коливання створюють двигуни, вентилятори, незбалансовані маси, що швидко обертаються та ін.

Вібрація, параметри якої змінюються в часі випадковим чином, називається **випадковою вібрацією**. Випадкова вібрація буває **стаціонарною, нестаціонарною, вузькосмуговою, широкосмуговою**.

Вузькосмугова вібрація може бути представлена як синусоїдальна вібрація з амплітудою, що випадково змінюється.

Широкасмугова вібрація - сукупність вузькосмугових вібрацій. Під впливом широкосмугових вібрацій в РЕА збуджуються одночасно коливання на всіх власних частотах, властивих цій апаратурі. Дія широкосмугової вібрації зустрічається рідко. На широкосмуговий вібрацію випробують РЕА, що має складну конструкцію і малий ресурс часу. У більшості випадків діють вузькосмугові вібрації, які можна замінити полігармонічними вібраціями.

Удар - швидка зміна швидкості на кінцеву величину за кінцевий проміжок часу. Після удару, якщо система пружна, виникають коливання, які можуть потрапити в резонанс із власними коливаннями радіоелементів або конструкції РЕА. Інтенсивність

ударного впливу залежить від форми імпульсу, амплітуди і тривалості ударного імпульсу.

Ударні навантаження характеризуються кількістю одиночних ударів або їх серією (зазвичай обумовлюють максимальне число ударів), тривалістю ударного імпульсу і його формою, миттєвою швидкістю при ударі, переміщенням тіл, що зіткнулися.

Формою ударного імпульсу називають залежність ударного прискорення від часу: $a = f(t)$.

Лінійні прискорення (перевантаження) - кінематичні впливи, що виникають при прискореному русі джерела.

Лінійні прискорення характеризуються прискоренням, тривалістю, знаком впливу прискорення.

Акустичний шум від зовнішніх джерел характеризується тиском звуку, потужністю коливань джерела звуку, силою звуку, спектром звукових частот. Акустичний шум механічно навантажує практично в рівній мірі всі елементи конструкції. За інших рівних умов дія акустичного шуму більш руйнівна, ніж дія ударно-вібраційних навантажень.

Перевантаження, що виникають при вібраціях, ударах і прискореннях, оцінюють відповідними коефіцієнтами.

Для зменшення впливу вібрацій і ударів апаратуру встановлюють на амортизатори або застосовують демпфуючі матеріали.

Вплив лінійних прискорень еквівалентний збільшенню маси апаратури і при значній тривалості впливу вимагає збільшення міцності конструкції. **Амортизатори від лінійних перевантажень практично не захищають.**

Як свідчить досвід експлуатації РЕА, що транспортується, найбільш руйнівню на конструкцію впливають вібрації. Як правило, конструкція апарату, що витримала вплив вібраційних навантажень в певному частотному діапазоні, витримує ударні навантаження і лінійні прискорення з великими значеннями відповідних параметрів.

2.2 Основні поняття та терміни

2.2.1 Поняття вібро (ударо) стійкості та вібро (ударо) міцності

Відносно конструкції РЕА розрізняють два поняття: вібро (ударо) стійкість і вібро (ударо) міцність.

Вібро (ударо) стійкість - властивість об'єкта при заданій вібрації (ударі) виконувати задані функції і зберігати значення своїх параметрів в межах норми.

Вібро (ударо) міцність - міцність при заданій вібрації (ударі) і після припинення її дії.

Вплив транспортної тряски складається з ударів і вібрацій. Введення амортизаторів між РЕА і об'єктом як середовища, що зменшує амплітуду переданих коливань і ударів, знижує діючі на РЕА механічні сили, але не знищують їх повністю. У деяких випадках утворена з введенням амортизаторів резонансна система тягне за собою виникнення низькочастотного механічного резонансу, який призводить до збільшення амплітуди коливань РЕА.

2.2.2 Поняття жорсткості та механічної міцності конструкції

При розробці конструкції РЕА необхідно забезпечити необхідну жорсткість і механічну міцність її елементів.

Жорсткість конструкції є відношення діючої сили до деформації конструкції, викликаній цією силою.

Під міцністю конструкції розуміють навантаження, яке може витримати конструкція без залишкової деформації або руйнування. Підвищення міцності конструкції РЕА пов'язане з посиленням її конструктивної основи, застосуванням ребер жорсткості, контровки болтових з'єднань та ін. Особливе значення має підвищення міцності несучих конструкцій і їх вузлів методами заливки і обволікання. Заливка піноматеріалом дозволяє зробити вузол монолітним при незначному збільшенні маси.

2.3 Джерела механічних впливів на РЕЗ

Стаціонарна і переносна апаратура може піддаватися механічним впливам при транспортуванні, землетрусах і вибухах.

Удари при перевезенні сухопутним транспортом виникають найчастіше під час гальмування.

На судновому транспорті ударні механічні навантаження виникають під час шторму при хитавиці судна і сильних ударах штормовий хвилі об борт корабля.

Ударні навантаження в літаках виникають в основному, при посадці.

Джерелами **лінійних прискорень** є будь-які транспортні засоби, що рухаються з прискоренням.

Джерелами **акустичного шуму** в РЕА є різні двигуни і механізми.

Віб्राції в РЕА виникають при її транспортуванні і при експлуатації. У залежності від цього розрізняють і джерела збудження вібрації, які необхідно визначити, щоб вірно розмістити апаратуру з урахуванням її вібростійкості та віброміцності.

При транспортуванні апаратури слід розрізняти внутрішні і зовнішні джерела збуджуючих коливань.

Внутрішніми джерелами є, наприклад, нерівномірне обертання валу двигуна, деталей трансмісії або ходової частини.

До **зовнішніх джерел** відносяться нерівності дороги, пульсуючі пориви вітру, атмосферна турбулентність, акустичний шум, хвилювання водної поверхні та інші збудники. Тому при виборі виду транспорту для перевезення апаратури необхідно погоджувати вібраційні характеристики апаратури і застосовуваних транспортних засобів. Кожному виду транспорту притаманні свої вібраційні і ударні навантаження, що впливають на апаратуру, і в той же час при різних способах транспортування спостерігаються загальні закономірності. Наприклад, загальним для всіх видів транспорту є те, що вібрації можна розглядати як випадкові стаціонарні процеси.

Параметри вібрацій важко передбачити в кожному конкретному випадку, але при розробці апаратури можна користуватися узагальненими наближеними даними, що наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Характеристики джерел вібрації

Джерело вібрації	Характеристики вібрацій
Транспортні засоби колісного типу	Частота збуджуючих коливань підвіски машини 2–10 Гц, кузова 8–15 Гц, прискорення 1 g; частота збудження двигуна 20–60 Гц.
Транспортні засоби гусеничного типу	Ударнозбуджуючі вібрації в діапазоні частот 400–700 Гц, амплітуда коливань на низьких частотах + 0,25 мм.
Корабель	Частоти збуджуючих коливань і прискорення: кормова частина 2–35 Гц, 0,05–0,5 g.
Літак	Частоти збудження 3–500 Гц, амплітуда коливань +3,8 мм на низьких частотах. Акустичні вібрації з частотою до 130 кГц на рівні 150 дБ вище звукового порогового рівня.
Керовані снаряди	Частота збуджуючих коливань 30–5000 Гц, прискорення 5–30g. На ділянці резонансу можливі прискорення до 40g. Акустичні вібрації з частотою до 10 кГц на рівні 130 дБ вище звукового порогового рівня.

При експлуатації стаціонарної радіоелектронної апаратури джерелами вібрації є: нерівноваженість обертових частин вентиляторів і електродвигунів; робота агрегатів електроживлення і перетворювачів струму. Такі джерела вібрації в більшості випадків можна ізолювати від апаратури і її віброчутливих елементів, якщо це своєчасно передбачити при конструюванні.

В рухомій апаратурі можна в якійсь мірі здійснити віброізоляцію апаратури і її елементів, але неможливо ізолювати самі джерела вібрації.

3. ДІНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗ ПРИ ВІБРАЦІЙНОМУ ВПЛИВІ

3.1 Конструкція РЕЗ як коливальна система

У загальному випадку конструкцію РЕА можна представити у вигляді складної коливальної системи. Вивчення цієї системи є важким завданням, яку практично не завжди можна виконати. Тому блоки апаратури умовно поділяють на прості еквівалентні коливальні системи з однією або двома ступенями вільності, тобто представляють їх у вигляді кінцевого числа простих механічних систем, що складаються з вантажу маси m_i , укріпленого на пружині, яка має жорсткість k_i (див. рисунок. 3.1).

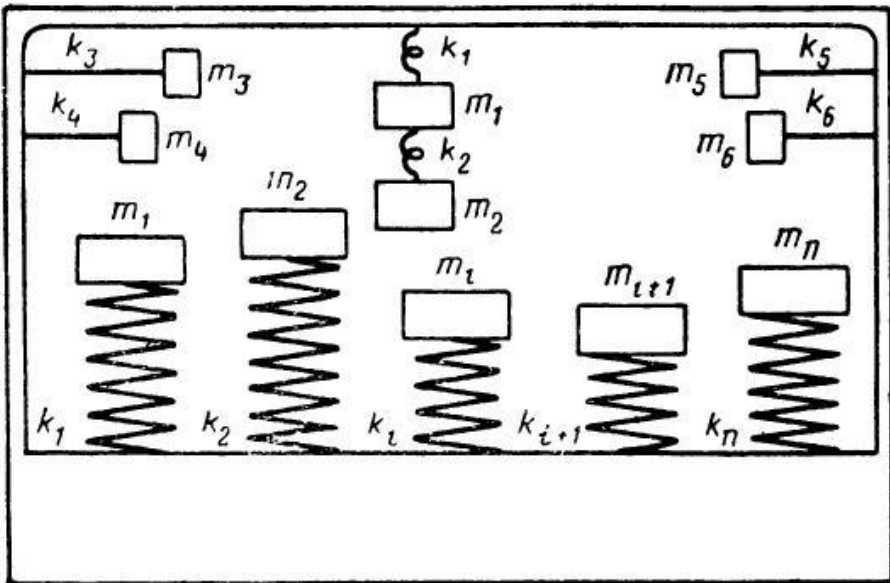


Рисунок 3.1 - Еквівалентна схема блока РЕЗ

Такий поділ складного пристрою на прості коливальні системи можливий, оскільки блок РЕА, як правило, складається з окремих вузлів, укріплених на шасі і пов'язаних між собою гнучкими з'єднаннями.

Крім того, при аналізі дії вібрації спочатку слід розраховувати коливальну систему, що складається з вузлів і елементів, які чутливі до вібрації, а потім вже систему, яка містить і нечутливі до вібрації елементи.

3.2 Коливання системи з одним ступенем вільності

Коливальною системою з одним ступенем вільності називається система, рух якої під дією прикладених сил цілком визначається зміною в часі однієї координати.

Система з одним ступенем вільності складається з вантажу з масою m , пружини з жорсткістю k і демпфера з коефіцієнтом демпфірування β . Рух маси m визначається зміною тільки однієї координати x (див. рисунок 3.2).

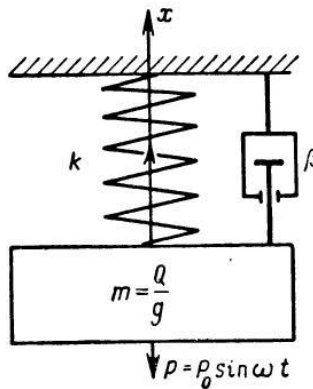


Рисунок 3.2 - Схема розрахунку коливальної системи

P - збуджуюча сила, що прикладена до маси m ;

k - жорсткість пружини;

β - коефіцієнт демпфірування

Рівняння руху системи може бути складено на основі принципу Даламбера, згідно з яким в кожен момент часу всі сили, що діють на систему, знаходяться в стані рівноваги, якщо в їх число включити силу інерції.

Отже, на систему діють сили:

інерції: $m \frac{d^2 x}{dt^2};$

пружності пружини: $kx;$

сила демпфірування, пропорційна швидкості маси і спрямована в бік, протилежний цій швидкості: $bx;$

збуджуюча сила: $P = P_o \sin \omega t$

За цих умов рівняння руху маси щодо положення статичної рівноваги буде:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + kx = p_o \sin \omega t \quad (3.1)$$

Розділивши обидві частини на m , отримаємо:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\delta_o \omega_o \frac{dx}{dt} + \omega_o^2 x = \omega_o^2 x_{CT} \sin \omega t \quad (3.2)$$

де:

$$\delta_o = \frac{\beta}{2\sqrt{mk}} \quad - \quad \text{параметр, пропорційний коефіцієнту}$$

демпфірування;

P_o - амплітуда діючої сили, Н;

$$x_{CT} = \frac{p_o}{k} \quad - \quad \text{подовження пружини, яке вона отримала б при}$$

дії на неї статичної сили, рівної P_o , м;

ω_0 - кругова частота власних коливань системи, рад / с, яка визначається за формулою :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.3)$$

При вирішенні диференціального рівняння (3.1) розрізняють вільні і вимушені коливання механічної системи.

Розглянемо спочатку вільні коливання, тобто коливання, обумовлені тільки станом самої системи. При вільних коливаннях права частина рівняння (3.1) перетворюється в нуль, тобто рівняння стає однорідним.

Припустимо, наприклад, що в початковий момент часу $t = 0$ масі m була надана миттєва швидкість v , а потім система була надана сама собі.

Рішення диференційного рівняння вільних коливань, що вдовольняє початковим умовам $\frac{d^2 x}{dt^2}(0) = x(0) = 0$; $\frac{dx}{dt}(0) = v$ за відсутності демпфірування $\delta_0 = 0$ матиме вигляд:

$$x = \frac{v}{\omega_0} \sin \omega_0 t = A \sin \omega_0 t \quad (3.4)$$

Таким чином, при цьому виникає періодичний синусоїдальний рух з власною частотою ω_0 .

З формули (3.3) випливає, що власна частота системи не залежить від початкових умов: зі збільшенням маси m частота зменшується, а зі збільшенням жорсткості пружини k - збільшується.

Жодній реальній системі присутнє **демпфірування**, яке характеризується величиною параметра $\delta_0 = 0,02 \dots 0,25$. Приймаючи

$\delta_o^2 \approx 0$, рішення рівняння вільних коливань можна записати у вигляді:

$$x = \frac{V}{\omega_o} e^{-\delta_o \omega_o t} \sin \omega_o t \quad (3.5)$$

З формули (3.5) витікає, що демпфірування якісно змінює характер коливань, оскільки навіть при малому значенні δ_o співмножник $e^{-\delta_o \omega_o t}$ протягом часу t наближається до нуля, и, слід, вільні коливання затухають и перестають бути періодичними.

Тепер розглянемо *вимушені коливання системи* під впливом гармонійної сили $P = P_o \sin \omega t$.

Загальне рішення рівняння (3.1) може бути представлене у вигляді суми рішення (3.5) однорідного рівняння і приватного рішення, відповідного гармонійної сили P :

$$x = A e^{-\delta_o \omega_o t} \sin(\omega_o t - \varphi_o) + \mu x_{ст} \sin(\omega t - \varphi) \quad (3.6)$$

де: φ - початкова фаза;

α - безрозмірний параметр, пропорційний частоті збуджуючої сили;

μ - коефіцієнт динамічності.

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{4 \delta_o^2 \alpha^2 + (1 - \alpha^2)^2}} \quad (3.7)$$

Коефіцієнт динамічності - безрозмірна величина, що вказує, у скільки разів амплітуда вимушених коливань при дії сили $P = P_o \sin \omega t$ більше статичного відхилення пружини під дією сили P_o .

Коефіцієнт динамічності набуває максимального значення при $\alpha = \sqrt{1 - 2\delta^2}$:

$$\mu_{\max} = \frac{1}{2\delta^2 \sqrt{1 - \delta^2}} \quad (3.8)$$

3.3 Явище резонансу

Якщо частота вимушених коливань співпадає з власною частотою ω_0 механічної системи без тертя ($\delta = 0$; $\alpha = 1$), то мають місце резонансні коливання.

За умови резонансних коливань та відсутності тертя повне рішення рівняння (3.1) при нульових початкових умовах має вигляд:

$$x = -\frac{\omega_0 x_{CT} t}{2} \cos \omega_0 t \quad (3.9)$$

З (3.9) видно, що амплітуда резонансних коливань наростає тим повільніше, чим менше коефіцієнт $\omega_0 x_{CT} / 2$, тобто чим менше частота власних коливань системи ω_0 і чим менший статичний прогин пружини під дією сили P_0 .

Звідси витікає, що при швидкому проходженні резонансної частоти амплітуда буде досягати меншого за розміром значення порівняно з амплітудою при повільному проходженні резонансу.

Формула (3.9) для коливальної системи без загасання ($\delta_0 = 0$) втрачає сенс при нескінченному зростанні часу, оскільки амплітуда коливань стає нескінченно великою. Однак якщо на таку систему в момент часу $t = 0$ починають діяти затухаючі коливання, частота яких дорівнює резонансній частоті системи, то диференціальне рівняння руху системи набуває вигляду:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 x_{CT} e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t \quad (3.10)$$

Якщо врахувати, що значення коефіцієнта загасання набагато менше частоти власних коливань системи, тобто: $\alpha \ll \omega_o$, рішення рівняння (3.10) має вигляд:

$$x = -\frac{\omega_o x_{CT} t}{2 \alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \sin \omega_o t \quad (3.11)$$

В цьому разі амплітуда синусоїдального коливання не наростає необмежено в часі, а прагне до стаціонарного значення:

$$A = \frac{\omega_o x_{CT}}{2 \alpha} \quad (3.12)$$

Якщо у системі присутнє тертя, то амплітуда коливань при резонансі буде обмежена і її величина залежить від коефіцієнта δ_o , пропорційного демпфіруванню β . Амплітуда коливань A_p системи з одним ступенем вільності при резонансі визначається за однією з формул:

$$A_p = \frac{x_{CT}}{2 \delta_o} = x_{CT} Q = \frac{250}{\gamma f_c^2} = P_o Q l_k = V \rho W l_k \quad (3.13)$$

де: $2 \delta_o = \frac{1}{Q} = \gamma$ - коефіцієнт непружного опору матеріалу;

$$x_{CT} = \frac{250}{f_c^2} - \text{статичний прогин, мм;}$$

$Q = \mu_{PEZ}$ - добротність механічної системи при малих значеннях δ_o ;

f_c - власна частота системи, яка з урахуванням коефіцієнта демпфірування δ_o незначно відрізняється від резонансної частоти

$$f_o = \frac{\omega_o}{2 \pi};$$

P_o - амплітудне значення сили, що діє на систему маса-пружина;

V - приведений об'єм маси;

ρ - щільність матеріалу вантажу;

$l_k = \frac{1}{k}$ - податливість пружної системи;

W - амплітуда діючого прискорення.

Коефіцієнт непружного опору γ і інші показники демпфірування визначаються наступними співвідношеннями:

$$\gamma = 2 \delta_o = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{\mu_p} \quad (3.14)$$

де: μ_p - коефіцієнт динамічності при резонансі (визначається за експериментальною резонансною кривою);

$\psi = \frac{\Delta\Pi}{\Pi}$ - коефіцієнт поглинання енергії за один період в одиниці об'єму матеріалу;

$\Delta\Pi$ - енергія, що відповідає площі петлі гістерезису;

$\Pi = \frac{P_p x_{CT}}{2}$ - енергія, що відповідає амплітуді деформації

x_{CT} ;

$\delta = \frac{\ln x_n}{x_{n+1}}$ - логарифмічний декремент коливання;

x_n, x_{n+1} - амплітуди згасаючих коливань, що відповідають початку і кінцю $(n + 1)$ -го циклу.

Під впливом вібрації можуть одночасно виникати власні і вимушені коливання і, таким чином, апаратура може піддаватися посиленням вібрацій. При одночасній дії вимушених і власних коливань амплітуда коливань може досягти подвійного значення в порівнянні з амплітудою сталих вимушених коливань.

3.4 Параметри та характеристики періодичних вібрацій

3.4.1. Параметри гармонійних коливань

Параметри гармонійних вібрацій визначаються зі співвідношення (3.4), яке запишемо у вигляді:

$$x = A \sin 2\pi f t \quad (3.15)$$

де: A - амплітуда вібрацій, м;

$f = 1/T$ - частота, Гц;

T - період вібрації, с

Швидкість вібрації визначається диференціюванням цього виразу за часом:

$$v = 2 A \pi f \cos 2\pi f t \quad (3.16)$$

Прискорення вібрації дорівнює другий похідній від переміщення за часом:

$$w = -(2\pi f)^2 A \sin 2\pi f t \quad (3.17)$$

Динамічне перевантаження (різкість) визначається як похідна від прискорення за часом:

$$n = (2\pi f)^3 A \cos 2\pi f t \quad (3.18)$$

Різкість вібрації характеризує швидкість зміни діючої сили, тобто величину динамічного перевантаження. Амплітуда різкості є додатковою характеристикою гармонійних вібрацій, за допомогою якої можна порівнювати режими вібраційних випробувань.

Як видно зі співвідношень (3.16) - (3.18), амплітуда швидкості вібрації пропорційно частоті, амплітуда прискорення пропорційна її квадрату, а амплітуда динамічного перевантаження - кубу.

Амплітуди переміщення A , швидкості v_a , прискорення W_a та різкості n_a пов'язані між собою наступними співвідношеннями:

$$n_a = \omega W_a = \omega^2 v_a = \omega^3 A \quad (3.19)$$

$$v_a^2 = A W_a \quad (3.20)$$

3.4.2 Параметри випадкових коливань

Механічні вібрації, що зустрічаються на практиці, рідко бувають чисто гармонійними. У більшості випадків вони складаються з декількох гармонійних коливань з різними амплітудами і частотами.

Складні вібрації можна аналізувати за допомогою осцилограм, визначаючи при цьому наступні параметри.

Пікове (максимальне) відхилення. При складній вібрації пікові значення амплітуд коливань істотно залежать від зсуву фаз між окремими складовими. На практиці можуть виникати випадкові сплески, поштовхи, удари, які в подальшому хоча і загасають, але можуть чинити сильний вплив на РЕА.

Максимальний розмах - різниця між максимальним і мінімальним значеннями відхилень за період.

Середнє арифметичне абсолютних величин окремих значень амплітуд коливань, відрахованих від середньої лінії.

Середнє арифметичне квадратів окремих значень амплітуд для гармонійних складових:

$$[x(t)]^2 = \sum_1^N \frac{A_n^2}{2}$$

Ця формула дає зв'язок потужності процесу з амплітудами A_n синусоїдальних складових, тобто потужність періодичних вібрацій дорівнює сумі потужностей гармонік. Залежність $\frac{A_n^2}{2}$ від частоти називається спектром потужності.

Середнє квадратичне, або ефективне, значення - корінь квадратний із середнього квадрата окремих значень амплітуд за період основної вібрації.

Середнє квадратичне значення для складної вібрації являє собою середню між піковою та середньою арифметичною.

Для гармонійної вібрації співвідношення між окремими параметрами цілком конкретне, тому вони можуть вимірюватися з достатньою точністю вимірювальними приладами. Обчислення

параметрів складних вібрацій за вимірюваними даними можуть давати різні результати.

Наприклад, в разі складної вібрації, що містить вищі гармоніки, обчислення амплітуди коливань за формулою (3.5) буде давати завищений результат, тому що значення вимірюваних величин A_n , що відносяться до вищих гармонік, потрібно ділити на квадрати відповідних їм більш високих частот і, крім того, амплітуди окремих складових повинні складатися геометрично, тобто з урахуванням зсуву фаз складових коливань.

3.5 Вібрації зі змінними параметрами

Вібрації зі змінними параметрами, що впливають на радіоелектронну апаратуру, за характером зміни параметрів умовно можна розділити на наступні три види:

- вимушені вібрації зі змінними параметрами;
- параметричні вібрації, викликані зміною параметрів коливальної системи під дією вимушених вібрацій;
- вібрації в коливальних системах з заздалегідь заданими змінними параметрами.

3.5.1 Вимушені вібрації зі змінними параметрами

До вимушених вібрацій зі змінними параметрами, насамперед, належать періодичні або майже періодичні вібрації зі змінними параметрами, які визначаються залежністю:

$$x = A(t) \sin \omega(t)t \quad (3.21)$$

Величини $A(t)$ та $\omega(t)$ змінюються з часом, та, слід, визначаються миттєвими значеннями амплітуди переміщення і частоти.

Миттєву швидкість вібрації можна отримати диференціюванням виразу (3.21) за часом:

$$\dot{x} = \dot{A} \sin \omega t + A(\omega + \dot{\omega}t) \cos \omega t, \quad (3.22)$$

а прискорення відповідно, його подвійним диференціюванням:

$$\ddot{x} = \left[\ddot{A} - A(\omega + \dot{\omega}t)^2 \sin \omega t \right] + \left[A(2\dot{\omega} + \ddot{\omega}t) + 2\dot{A}(\omega + \dot{\omega}t) \right] \cos \omega t \quad (3.23)$$

З формул (3.22) і (3.23) витікає, що швидкість і прискорення вібрації будуть також періодичними функціями з тієї ж змінною частотою $\omega(t)$, що й вихідне переміщення $x(t)$.

3.5.2 Метод хитної частоти. Метод змінних амплітуд

Амплітуди швидкості та прискорення мають складну залежність від параметрів вібрації та їх похідних, тому при стендових випробуваннях задають закон зміни прискорення.

Для отримання необхідного закону зміни частоти використовують *метод хитної частоти* або *метод змінних амплітуд*.

При використанні *методу хитної частоти* прискорення змінюється за законом:

$$\ddot{x} = W \sin[\omega(t)t] \quad (3.24)$$

де: W — амплітуда прискорення, що не залежить від часу;

$\omega(t)$ - частота, що повільно змінюється в часі від номінального значення до найбільшого і назад.

При низьких частотах (до 50 Гц) задається закон переміщення:

$$x = A \sin[\omega(t)t] \quad (3.25)$$

де A — постійна амплітуда вібрації.

При проведенні випробувань підтримують постійними наступні параметри: піддіапазони зміни частоти, амплітуду зміщення або амплітуду прискорення, час і швидкість зміни частоти для кожного піддіапазону.

Похідну від частоти вібрації в процесі випробувань змінюють пропорційно частоті, тобто частота вібрації змінюється в часі за логарифмічним законом:

$$\ln \omega = kt \quad \text{або} \quad \omega = e^{kt} \quad (3.26)$$

Оскільки демпфірування механічних систем зменшується з ростом частоти коливань, то точнішою буде лінійна залежність між похідною частоти за часом і частотою в дробовому ступені, тобто:

$$\dot{\omega} = k\omega^\gamma \quad (3.27)$$

Метод хитної частоти застосовується для випробувань виробів на вібростійкість і віброміцність, а також для визначення частоти їх власних коливань і зняття частотних характеристик.

Цей метод зручний тим, що дозволяє безпосередньо визначити частоти власних коливань випробовуваної конструкції і величини амплітуд при резонансі, виявити, яка з власних частот конструкції має найбільший вплив на роботу апаратури в умовах експлуатації.

В процесі випробувань підтримують постійними прискорення, швидкість або зміщення платформи вібростенда. Величини цих параметрів залежать в основному від конструкції апаратури і умов її експлуатації. Як правило, випробування на вібрацію проводять спочатку при постійній величині зсуву на низьких частотах, потім продовжують їх при постійному прискоренні на більш високих частотах. Частота переходу від режиму вібрації при постійному зміщенні до режиму вібрації при заданому прискоренні залежить від умов експлуатації апаратури.

Якщо закон зміни частоти задається за *методом змінних амплітуд*, то:

$$\ddot{x} = W(\omega) \sin[\omega t] \quad (3.28)$$

де: $W(\omega)$ — амплітуда прискорення, що змінюється в залежності від частоти ω ;

ω — частота, що задається як параметр.

Залежності амплітуд переміщення і прискорення від частоти показані на рис. 3.3.

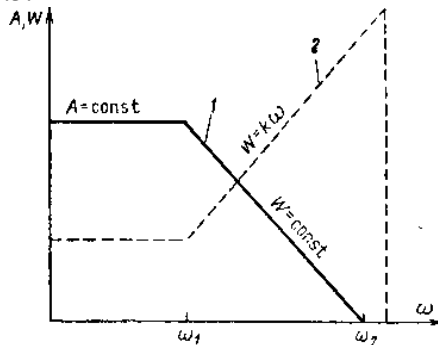


Рисунок 3.3 - Залежності амплітуди переміщення A та прискорення W від частоти ω .

1 — зміна амплітуди A при постійній амплітуді прискорення W у діапазоні частот $\omega_1 \dots \omega_2$;

2 — зміна амплітуди A при лінійній зміні амплітуди прискорення W в залежності від частоти.

3.5.3 Биття

До вимушених вібрацій зі змінними параметрами відносяться і явища биття.

Биття спостерігаються в тому випадку, коли частота вимушених коливань ω незначно відрізняється від частоти ω_0 власних коливань системи. При цьому биття є гармонійною вібрацією з частотою $(\omega + \omega_0)/2$ та з амплітудою, що періодично змінюється.

Кількість одиниць биття в одиницю часу дорівнює різниці між частотою власних коливань системи і частотою сили, що їх викликає:

$$f_{\delta} = \frac{\omega - \omega_0}{2\pi} \quad (3.29)$$

Рішення рівняння (3.1) при $\delta = 0$ має досить складний вигляд, але якщо значення ω та ω_0 близькі, амплітуда биттів приблизно дорівнює:

$$A_{\delta} \approx \frac{x_{ст}}{m(\omega - \omega_0)} \sin \frac{\omega - \omega_0}{2} t \quad (3.30)$$

При дослідженні дії вібрації на апаратуру явище биття слід відрізнити від резонансу: при резонансних коливаннях амплітуда вібрацій необмежено зростає в часі, а амплітуда биття періодично змінюється в часі.

Резонанс і биття - явища суттєво різні і по-різному впливають на міцність конструкції РЕА. Резонанс може викликати механічні руйнування, в той час як при биттях цього може не бути. Биття можуть виникати і в тому випадку, коли власні частоти елементів близькі одна до одної.

4. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ НА РЕА ТА ЇЇ ЕЛЕМЕНТИ

4.1 Характерні особливості дії вібрацій на конструкцію РЭА та її елементи

Зовнішні вібрації впливають на корпус апаратури і викликають механічні навантаження в шасі і елементах блоку. Реакції елементів блоку на вібрації передаються в свою чергу шасі блоку корпусу апаратури.

За певних умов реакція елементів може гасити вібрації корпусу. При цьому сили, що діють на елементи, будуть найбільшими і можуть бути навіть руйнівними.

Це явище називається динамічним поглинанням і пояснюється наступним чином. Якщо корпус має достатню жорсткість, тобто його власні частоти вище максимальної частоти вібрації, що впливає, а жорсткість шасі, елементів кріплень і монтажу значно менше жорсткості корпусу, то еквівалентна коливальна система може бути представлена у вигляді, показаному на рис. 4.1.

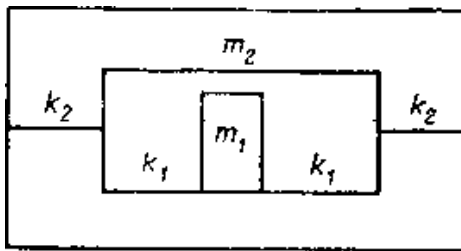


Рисунок 4.1 - Еквівалентна коливальна система з двома ступенями вільності:

m_1 - маса елемента; k_1 - жорсткість днища шасі блоку у місцях кріплення елементів;

m_2 - маса блоку; k_2 - жорсткість деталей кріплення блоку до корпусу.

Нехай на корпус діють гармонійні вібрації $x = x_{CT} \sin \omega t$, які створюють прискорення, спрямовані уздовж вертикальної осі. З теорії коливань відомо, що амплітуди коливань першої і другої маси будуть:

$$A_1 = \frac{x_{CT}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2}\right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2} + \frac{k_1}{k_2}\right)},$$

$$A_2 = \frac{x_{CT} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right)}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2}\right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2} + \frac{k_1}{k_2}\right) - \frac{k_1}{k_2}}, \quad (4.1)$$

де: x_{CT} - статична деформація деталей кріплення шасі до корпусу;

$\omega_1^2 = \frac{k_1}{m_1}$ - квадрат власної частоти системи днище шасі -

маса елементів, що закріплені на днищі;

$\omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2}$ - квадрат власної частоти системи: деталі кріплення

шасі до корпусу - маса шасі та всіх елементів.

З формул (4.1) витікає, що якщо маса m_1 і жорсткість k_1 такі, що $\omega_1 = \omega$, тобто власна частота системи днище шасі - маса елементів дорівнює частоті діючої вібрації, то амплітуда вібрації всього шасі A_2 теоретично буде дорівнює нулю, а амплітуда вібрації елемента на днище шасі A_1 буде максимальною, тобто цей елемент отримує максимальні прискорення і є динамічним поглиначем коливань шасі.

При конструюванні РЕА динамічного поглинання слід уникати.

Конструкція радіоелектронної апаратури повинна бути **вібростійкою і віброміцною**.

Вібростійкість визначає ступінь чутливості апаратури до динамічних навантажень. Вона характеризується значеннями амплітуд

прискорень і частот вібрації, при яких не порушується нормальне функціонування апаратури.

Віброміцність визначає здатність апаратури витримувати без руйнування тривалі вібраційні навантаження. Вона характеризується максимальними амплітудами прискорень, власними частотами апаратури і її окремих, демпфірувальними властивостями матеріалу конструкції і тривалістю дії вібраційного навантаження.

РЕЗ є складними багатoeлементними конструкціями, що мають спектр статичних пружних характеристик. Крім цього, елементи мають різну масу, і, отже, виріб в цілому може мати велику кількість власних частот, які при збігу з частотами діючих вібрацій можуть створити практично суцільний спектр резонансних частот. Тому ймовірність пошкодження апаратури при дії вібрації буде пропорційна кількості резонансних частот в заданому діапазоні частот.

Допустимі прискорення, що характеризують вібростійкість елементів і апаратури, в більшості випадків менше прискорень, при яких виконуються умови віброміцності, і які повинні перевищувати прискорення діючих вібрацій. Отже, конструкція апаратури повинна бути віброміцною і такою, щоб прискорення, які впливають на радіoeлементи, не перевищували значень, що визначають вібростійкість, тобто конструкція повинна мати демпфіруючі властивості.

Одночасне задоволення вимог вібростійкості і віброміцності апаратури є характерною особливістю конструювання РЕА.

4.2 Дія вібрацій на стаціонарну РЕА

В даному випадку під стаціонарною апаратурою розуміється апаратура, яка при функціонуванні залишається нерухомою і в разі необхідності може бути транспортованою будь-яким видом транспорту в інше місце.

Розрізняють вібрації, що діють на стаціонарну апаратуру *при її функціонуванні і при транспортуванні*.

Вібрації при функціонуванні апаратури виникають внаслідок внутрішніх джерел і, як правило, мають знижені рівні прискорень і фіксовані, цілком певні частоти.

Такими джерелами вібрації можуть бути вентилятори, перетворювачі напруги, антенні пристрої, що обертаються, генератори джерел живлення. Внутрішні джерела вібрації необхідно визначати в кожному конкретному випадку і вібрацію ізолювати. Якщо кожне джерело вібрації неможливо віброізолювати, то необхідно ізолювати від вібрації лінійки і елементи блоку, які чутливі до вібрації.

Внутрішні вібрації, як правило, впливають тільки на вібростійкість апаратури і майже не впливають на її віброміцність. Рівні прискорень і частоти таких вібрацій значно відрізняються від вібрацій, що впливають на апаратуру при транспортуванні.

Так, наприклад, вимірювання параметрів вібрацій апаратури, встановленої в кабіні причепа при одночасній роботі вентилятора, що нагнітає, та витяжного, встановлених на амортизаторах в стінах кабіни, показали, що частоти мають дискретні значення в діапазонах 100-130; 210-240 і 1000-1200 Гц, а амплітуди прискорень не перевищують 0,1 g.

Частоти вібрацій, створюваних вентилятором:

$$f_k = ki \frac{zn}{60} \quad (4.2)$$

де: $k = 1, 2, 3...$

n - частота обертання вала електродвигуна, об/хв.;

z - кількість лопатей вентилятора;

i - передавальне відношення.

4.3 Дія вібрацій на РЭА, що встановлюється на рухомих об'єктах

На відміну від стаціонарної РЕА, яка підлягає транспортній вібрації у непрацюючому стані, апаратура, встановлена на рухомих об'єктах, повинна надійно функціонувати при русі об'єкта. При цьому РЕА може підлягати дії більш інтенсивної вібрації, ніж при транспортуванні.

У загальному випадку при русі об'єкта на апаратуру впливають **сталі і випадкові вібрації**. Ці вібрації по-різному діють на апаратуру,

тому слід окремо розглядати вплив кожної з цих вібрацій і їх одночасна дія.

Амплітуду коливань *сталих вібрацій* можливо визначити для будь-якого моменту часу, тоді як амплітуду *випадкової вібрації* можна визначити тільки як ймовірність її появи.

Правильне визначення параметрів реально діючих вібрацій є основним практичним завданням при проектуванні апаратури, яка встановлюється на рухомих об'єктах. Завищені вимоги до параметрів вібрації призводять до непотрібного збільшення жорсткості і ваги конструкції апаратури і, як наслідок, до зниження характеристик рухомого об'єкту. Наприклад, якщо апаратура встановлюється на автомобілі і вимірювання показали, що при русі виникають вібрації з максимальним прискоренням $W = 2g$ на частотах 3... і 100...150 Гц, то немає необхідності розраховувати апаратуру на прискорення $W = 4g$ і випробувати при такому прискоренні і задовольняти вимогу відсутності резонансів елементів конструкції в діапазоні частот 10-40 Гц, хоча це передбачено нормами на параметри вібрації для даного класу автомобілів.

4.4 Вплив вібрацій на функціонування РЕА

Дія вібрації може приводити до прихованих або важко контрольованих порушень функціонування радіоелектронної апаратури. При цьому руйнувань або незворотних відмов може і не бути, що значно ускладнює виявлення причин, що викликають порушення функціонування, і вимагає ретельного контролю роботи всіх елементів апаратури.

Відомі випадки, коли відсутність ретельного контролю роботи апаратури при дії вібрації призводило до аварійного результату.

Тому *при випробуваннях на вібростійкість основним завданням* є виявлення самого процесу дії вібрації на функціонування елементів, встановлених в конструкції. Після вирішення цього завдання розробляється методика контролю функціонування апаратури в процесі експлуатації. Якщо при випробуванні за такою обґрунтованою методикою апаратура не задовольняє вимогам вібростійкості, то в схему і конструкцію апаратури вносяться зміни або вводиться амортизація конструкцій РЕА.

У багатьох випадках порушення функціонування апаратури є наслідком явища механічних резонансів, що викликаються зовнішніми вібраціями в деталях.

Дія вібрації на вібростійкість радіоелементів і виробів в цілому викликається різними явищами.

При впливі вібрації на підлаштовуючі конденсатори відбувається зміна встановленої ємності, що призводить до зміни настройки контурів. Флуктуація ємності підлаштовуючих конденсаторів при дії вібрації приймається за основний параметр віброчутливості конденсатора.

При дії вібрації на з'єднувальні кабелі в них з'являються заряди, що викликаються тертям в матеріалі кабелю.

Зміни коефіцієнта індуктивності виникають при дії вібрації на пристрої, що містять індуктивні струмоznими.

На напівпровідникові прилади завдяки їх незначній масі вібрації і удари впливають в меншому ступені. При тривалих механічних впливах можливі обриви виводів і порушення контактів.

Особливу увагу слід приділяти вібраційним характеристикам матеріалів, які в процесі експлуатації піддаються дії вібрацій і нагрівання. При коливаннях металевих деталей частина енергії поглинається усередині матеріалу внаслідок внутрішнього тертя. З підвищенням температури значення внутрішнього тертя матеріалу зростає, при цьому буде змінюватися вібростійкість конструкції.

У загальному випадку вібрації та нагрівання пружно напружених конструкцій змінюється амплітуда вібрації і резонансна частота, тому при виборі матеріалів для деталей конструкції слід враховувати:

- статичні характеристики механічних властивостей: межі пружності, повзучості, міцності і їх залежність від температури;
- динамічні характеристики: модуль пружності і внутрішнє тертя;
- зміна механічних властивостей при деформації.

Матеріали, що застосовуються для створення надійних і вібростійких конструкцій, повинні мати велике внутрішнє тертя, тобто високий коефіцієнт загасання.

Дія вібрації на радіоелектронну апаратуру і її елементи в будь-якому випадку знижує надійність її роботи. Тому дослідження дії вібрації з метою зменшення її дії на апаратуру тісно пов'язані з дослідженнями підвищення надійності роботи РЕА.

5. АНАЛІЗ ВПЛИВУ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РЕАКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ

5.1 Поняття удару. Характеристики удару

У механіці ударом твердих тіл називають такий рух, при якому за дуже малий проміжок часу відбуваються кінцеві зміни кількості руху твердих тіл.

При ударі відбувається кінцева зміна швидкості V , а отже, і кількості руху mv за дуже малий проміжок часу, званий в подальшому **тривалістю імпульсу** τ .

Величина сили взаємодії тіл за час їх зіткнення визначається імпульсом сили або ударною силою

$$F = \int_0^{\tau} F(t) dt \quad (5.1)$$

де $F(t)$ - миттєве значення сили, що діє при ударі.

Приріст кількості руху при ударі визначається за формулою:

$$mv - mv_0 = \int_0^{\tau} F(t) dt \quad (5.2)$$

де v_0 - швидкість на початку удару;

v - швидкість наприкінці удару;

m - маса точки, що зіткнулася.

З рівняння (5.2) випливає, що при малій тривалості імпульсу τ приріст кількості руху буде мати кінцеву величину тільки в тому випадку, якщо імпульс сили F має велику величину.

У механіці розрізняють **пружний і непружний удари** точки по нерухомій поверхні.

Якщо v - швидкість до удару, v' - швидкість після удару, то:

- при $v' = 0$ удар називають **абсолютно непружним**; відбувається повна втрата нормальної складової швидкості;

- при $v' = -v$ удар називають **абсолютно пружним**; в цьому випадку нормальна складова швидкості не змінюється за величиною, а тільки змінює свій напрямок на протилежний;

• при $v' = -k_y v$ удар називають **недостить пружним**, тобто відбувається часткова втрата нормальної складової швидкості за величиною.

Коефіцієнт k_y називається коефіцієнтом удару або коефіцієнтом відновлення швидкості при ударі. Він характеризує пружність, пластичність і інші механічні властивості тіл, що зіткнулися, і тому використовується при налаштуванні стендів, що застосовуються для випробування апаратури на удар.

Коефіцієнт відновлення швидкості залежить також від величини швидкості v і висоти h , з якої падає тіло. Тому коефіцієнт відновлення експериментально визначається за результатами вимірювань висоти падіння тіла h і висоти його відскоку після удару h' .

$$k_y = \frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{h'}{h}}.$$

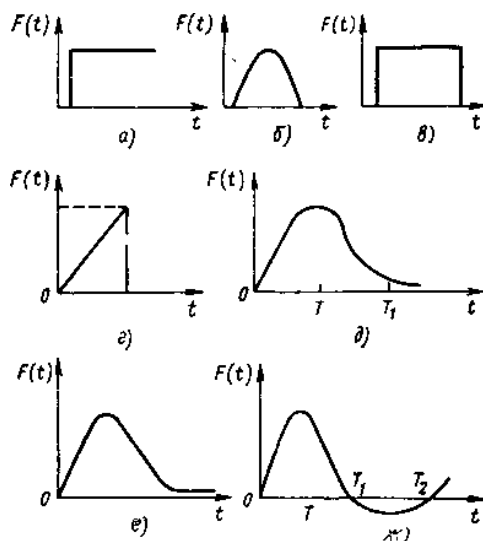
Коефіцієнт відновлення швидкості при пружному ударі залежить від форми тіл і співвідношення їх мас. Цей коефіцієнт визначає втрачену при ударі кінетичну енергію.

Крім імпульсу сили F , тривалості імпульсу τ і коефіцієнта відновлення швидкості k_y ударний процес характеризується ще **формою ударного імпульсу**.

При дослідженні ударних процесів розрізняють ударні імпульси **простий і складної форми** (рис. 5.1, 5.2).

До **ударних імпульсів простої форми** відносять швидкісний удар, викликаний зміною прискорення, швидкості, зміщення. Форма цих імпульсів може бути описана простою математичною формулою.

До **ударних імпульсів складної форми** відносять такі імпульси, які не можуть бути виражені простою функцією залежності від часу, а можуть бути представлені енергетичним спектром удару. **Спектром удару** називають залежність максимальних реакцій простих еквівалентних коливальних систем, що викликаються ударним імпульсом, від частоти власних коливань цих систем. При цьому передбачається, що еквівалентні системи не мають загасання.



а - ступінчастий; б - напівсинусоїдальний; в - прямокутний; г - пілкоподібний; д - синусоїдально-експоненційний, е - лінійно-експоненційний, ж - знакозмінний.

Рисунок 5.1 - Прості форми ударних імпульсів

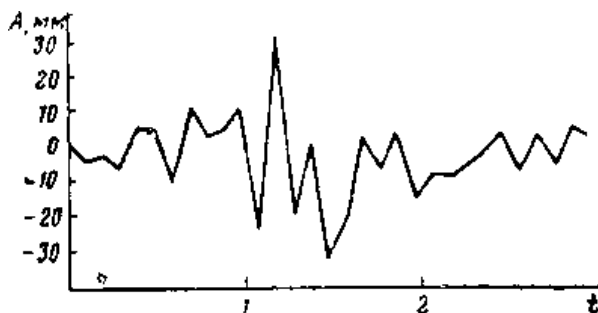


Рисунок 5.2 - Ударний імпульс складної форми

Спектр удару не дає уяви про характер руху під час удару, а тільки вказує на можливість несправності.

5.2 Швидкісний удар

Удар, що розглядається як раптова зміна швидкості, являє собою простий (швидкісний) удар, що складається з ударних рухів різного виду. Передбачається, що такий удар являє собою імпульс нескінченно малої тривалості, тому величина прискорень і форма хвилі є несуттєвими.

Удари, викликані падінням апаратури, або удари порівняно легкої апаратури по міцних поверхнях можуть також розглядатися як швидкісні удари.

Якщо, наприклад, раптово змінюється швидкість руху при падінні на землю вантажу масою m , підвішеного на пружині з жорсткістю k , то вантаж буде коливатися з максимальними швидкостями і зміщенням щодо каркаса.

$$\text{З рівності кінетичної і потенційної енергії} \quad \frac{mv^2}{2} = \frac{kx_{CT}^2}{2}$$

$$\text{витікає: } \frac{v}{x_{CT}} = \sqrt{\frac{k}{m}} = \omega \quad (5.3)$$

Перевантаження під час удару:

$$n = \frac{\ddot{x}}{g} = \frac{v}{g} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.4)$$

Розглянемо три величини: максимальне відхилення x_{CT} , максимальне перевантаження n , яке відчувають маса m і каркас, і жорсткість пружини k . Дві з цих величин є незалежними. Якщо вони відомі, то можна обчислити третю величину.

Явище швидкісного удару зазвичай відтворюється при випробуваннях апаратури на падіння.

5.3 Імпульсний удар

Імпульсний удар - раптова зміна прискорення або силового імпульсу з простою відомою формою.

Імпульсний удар діє на апаратуру, що складається з численних елементів, кожен з яких має власну частоту механічних коливань, відмінну від власної частоти іншого елемента.

При цьому при випробуваннях на удар апаратуру можна розглядати як систему, що складається з великої кількості одномасових систем з різними власними частотами. Спектр ударних прискорень в даному випадку визначається як функція максимальних прискорень в залежності від власних частот різних одномасових систем.

Максимальні значення прискорень при ударі залежать як від власної частоти, так і від характеристик ударного імпульсу.

Диференціальне рівняння коливання одномасової системи без урахування демпфірування при дії імпульсу пілкоподібної форми можна записати у вигляді:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = f(t) \quad (5.5)$$

$$f(t) = \begin{cases} \frac{at}{\tau}; & 0 \leq t \leq \tau \\ 0; & t > \tau \end{cases}$$

де: τ - тривалість наростання ударного імпульсу;

$\ddot{x}$ - прискорення, що діє на масу m ;

ω^2 - прискорення реакції пружного зв'язку з жорсткістю k ;

$\frac{at}{\tau}$ - прискорення імпульсного удару, що діє на систему;

$\omega^2 = \frac{k_i}{m_i}$ - власна частота механічної системи.

Рішення рівняння (5.5) за нульових початкових умов ($x_0 = \dot{x}_0 = 0$ при $t = 0$) має вигляд:

$$x = \frac{a}{\omega^2} \left(\frac{t}{\tau} - \frac{1}{\omega \tau} \sin \omega t \right) \quad \text{при } 0 < t < \tau \quad (5.6)$$

Прискорення реакції пружного зв'язку, яке визначає динамічний ефект і яке необхідно обчислити для визначення реакції елементів системи на імпульсний удар, можна записати у вигляді:

$$\omega^2 x = \left(\frac{at}{\tau} - \frac{a}{\omega\tau} \sin \omega t \right) \text{ при } 0 < t < \tau \quad (5.7)$$

При цьому на масу m буде діяти прискорення:

$$\ddot{x} = -\frac{a}{\omega\tau} \sin \omega t \text{ при } 0 < t < \tau$$

На низьких частотах (при $\sin \omega t \approx \omega t$) це значення співпадає з прискоренням діючого імпульсного удару:

$$\ddot{x} = \frac{at}{\tau} \text{ при } 0 < t < \tau \quad (5.8)$$

При цьому прискорення реакції пружного зв'язку за час наростання ударного імпульсу буде найменшим.

Межі власних частот, при яких прискорення реакції пружних зв'язків близькі до нуля, наведені в табл. 5.1, а при яких вони максимальні за час наростання імпульсу - в табл. 5.2

Таблиця 5.1 - Верхні межі власних частот, при яких прискорення реакції пружних зв'язків близькі до нуля

τ , мс	0,5	1	2	3	5	6
f , Гц	60	30	15	10	6	5

Таблиця 5.2 - Нижні межі власних частот, при яких прискорення реакції пружних зв'язків максимальні

τ , мс	1	2	3	5	6	30	120
f , Гц	750	375	250	150	120	25	6

Аналіз спектру прискорень при дії імпульсу пилкоподібної форми дозволяє зробити наступні висновки.

Для збудження максимальних прискорень в елементах, що мають високі власні частоти, тривалість ударного імпульсу повинна бути найменшою.

Для збудження максимальних прискорень в елементах з низькими власними частотами тривалість ударного імпульсу повинна бути найбільшою, приблизно, 0,12 0,15 сек. При цьому прискорення, що створюються ударом в деталях апаратури, будуть діяти в широкому діапазоні частот - від 6 Гц і вище, що відповідає навантаженням під час випробовування апаратури при транспортуванні.

При однакових заданих прискореннях удар з більшою тривалістю імпульсу має більш широкий спектр максимальних прискорень реакції пружного зв'язку в порівнянні з ударом, який має малу тривалість імпульсу.

Отже, ударний імпульс пилкоподібної форми великої тривалості впливає на більшу кількість деталей апаратури, частоти власних коливань яких збігаються з частотами спектра прискорень при ударі.

6. КОНСТРУКТИВНІ МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ДІЇ ВІБРАЦІЙ ТА УДАРІВ

6.1 Вимоги до механічних характеристик РЕА

Перед початком конструювання вироби потрібно визначити дані про параметри механічних впливів, які діятимуть на нього в процесі експлуатації. Ці дані задаються в технічному завданні.

Зіставляючи характеристики елементів з заданими параметрами механічних впливів, конструктор може вирішити питання про можливості проекрованої апаратури і її надійності. При цьому основне завдання конструктора полягає в тому, щоб вибрати таке розташування застосовуваних елементів, при якому механічні навантаження на нього будуть найменшими. Якщо таке розташування елементів і приладів не вдається знайти, то необхідно використовувати засоби зниження дії механічних навантажень. Таким чином, вже в процесі конструювання конструктор наближено оцінює віброміцність та вібростійкість проектуємої апаратури.

Основне правило наближеної оцінки задоволення умовам віброміцності полягає в узгодженні спектрів прискорень елементів зі спектром прискорень конструкції.

Наприклад, узгодження спектрів прискорень корпусу (шасі) і радіоелементів полягає в наступному.

У заданому діапазоні частот за кожною з трьох координатних осей прискорень елемента викреслюють залежність максимальних прискорень від частоти, при яких заданий елемент задовольняє вимогам вібростійкості та віброміцності. Аналогічно, при заданих прискореннях у тому ж діапазоні частот обчислюють спектр прискорень шасі в місці установки елемента РЕА. Потім ці спектри порівнюють.

Якщо максимальні прискорення елемента, при яких він відповідає механічним вимогам у всьому діапазоні частот, перевищують прискорення шасі, то вважається, що спектри прискорень узгоджені. В іншому випадку спектри вважаються неузгодженими і необхідно збільшити механічну жорсткість і демпфірування шасі.

Якщо підвищити жорсткість або збільшити демпфірування шасі неможливо, то елемент апаратури треба розмістити в іншому місці шасі або змінити його положення.

Попередня оцінка вібростійкості та віброміцності проектуємої РЕА проводиться на основі вивчення досвіду експлуатації аналогічних конструкцій або шляхом спрощеного розрахунку максимальних механічних впливів, які може витримати апаратура. Максимальні значення параметрів механічних навантажень, які може витримати апаратура, залежать від механічних характеристик застосовуваних радіоелементів і від передавальних або частотних характеристик конструкції блоків РЕА. При цьому в основу розрахунку закладають характеристики тих елементів, які витримують менші механічні дії.

У будь-якому випадку конструктор повинен прагнути розробити таку конструкцію блоку, яка послаблювала б дію сил вібрації і, отже, витримувала великі механічні дії.

6.2 Віброміцні конструкції кріплення вузлів РЕА

Кріплення деталей і вузлів на шасі виконують за допомогою роз'ємних та нероз'ємних з'єднань. До конструкції будь-якого кріплення пред'являються наступні вимоги:

- віброміцність при дії заданих прискорень в певному діапазоні частот і удароміцність при дії заданих ударних навантажень;
- відсутність місцевих резонансних вібрацій, тобто кріплення не повинно посилювати вібрації, що передаються від шасі до елемента або вузлу.

Віброміцність кріплення залежить від конструкції, матеріалу, технології виготовлення, від величини діючих прискорень і маси деталі або вузла, що закріплюється.

У деяких випадках роблять спрощений розрахунок на міцність для підвищення віброміцності кріплення, проте найчастіше такі розрахунки не проводять, оскільки зазвичай використовують стандартні елементи кріплення або нормалізовані кріплення. Пояснюється це тим, що поломки правильно застосованих кріплень при механічних впливах на РЕА бувають порівняно рідко, а розрахунок на міцність великої кількості кріплень є недоцільним.

Для попередження самовідгвинчування різьбових з'єднань в апаратурі, що при експлуатації підлягає дії вібрації та ударів, використовують різні види стопоріння.

РЕ, маса яких не перевищує 8 г, можна кріпити на власних виводах шляхом пайки. Якщо маса елемента перевищує 8 г, то застосовують додаткові кріплення елемента або його виводів, використовують заливку компаундом, приклеювання клеєм або мастикою.

Проводи, кабелі і кабельні з'єднання самі по собі нечутливі до дії ударів і вібрацій. Однак вони мають велику гнучкість, внаслідок чого власна частота секції проводу або кабелю мала і може виявитися в діапазоні частот збуджуючих сил. Змінні напруження, що розвиваються при цьому в проводах, можуть викликати втому металу. Обриви відбуваються найчастіше на кінцях секції проводу або кабелю, тобто поблизу роз'ємів (пайок). Обриви можуть виникнути також внаслідок тертя проводів об деталі апаратури або один об інший. Кабель, що пропускається через отвір, повинен бути захищений гумовою втулкою.

При кріпленні проводів, джгутів і кабелів до корпусу за допомогою клею, компаунда або мастики довжина прямолінійних ділянок в залежності від діаметра дроту джгута або кабелю вибирається в межах 50 мм - 200 мм.

Не допускається приклейка джгута або окремого провідника до радіoelementу, сильно нагрівається в процесі роботи.

6.3 Віброміцні шасі та каркаси

Шасі блоків РЕА виготовляють з листового та профільного матеріалу, для підвищення жорсткості шасі іноді роблять литими.

6.3.1 Штамповані шасі

Найбільшого поширення набули штамповані шасі блоків РЕА. При конструюванні таких шасі необхідно звертати особливу увагу на збільшення жорсткості конструкції.

Для підвищення жорсткості штампованого шасі рекомендується:

- застосовувати кутові і пластинчасті накладки;
- кути конструкцій шасі виконувати внакладку, при цьому перекриваються ділянки листа, з'єднані заклепками або точковим зварюванням, що є найжорсткішими ділянками конструкції і можуть використовуватися для кріплення шасі до каркасу;
- прагнути до зменшення розмірів шасі; якщо шасі мінімальних розмірів сконструювати неможливо, то слід вводити в конструкцію поперечні або поздовжні перегородки, що розділяють шасі на осередки;
- вибирати радіус вигину листа матеріалу шасі за можливості великим, але не менше товщини листа.

Елементи апаратури потрібно розміщувати на шасі так, щоб ті з них, які мають велику вагу, наприклад трансформатори, електродвигуни, знаходилися ближче до кутів шасі або до його краю. Якщо ці елементи необхідно встановити в центрі шасі, то слід застосовувати додаткову перегородку або ребра жорсткості для збільшення міцності конструкції.

6.3.2 Литі шасі

Шасі цього типу мають найбільшу жорсткість, але їх конструювання та виготовлення вимагають великих витрат праці. Литі шасі, на відміну від гнучких штампованих, різко знижують ймовірність обриву виводів і зіткнення елементів.

Найбільш доцільним методом виготовлення шасі є лиття під тиском. Виливки виходять ущільненими, мають підвищену механічну міцність, точні розміри, чисту поверхню, яка вимагає незначного механічної обробки.

6.3.3 Каркаси

Якщо в одному каркасі розташовано кілька шасі, він повинен виконувати функції захисного кожуха і одночасно служити захистом від впливу ударів і вібрацій. Як правило, потрібно, щоб шасі можна було вільно виймати з каркаса (стійки). Якщо конструкція шасі задовольняє вимогам жорсткості, наступним кроком буде конструювання каркаса.

До конструкції каркаса ставляться такі вимоги:

- оптимальна жорсткість для заданих вібраційних впливів;
- необхідна міцність.

Горизонтальні розміри каркаса зазвичай відповідають ширині і глибині шасі. Шасі розташовуються одне над іншим. За винятком дуже легких конструкцій, раму каркасу (стіжки) збирають із сталевих або алюмінієвих елементів, що з'єднуються зварюванням, заклепками або різьбовими з'єднаннями.

6.3.4 Конструктивні методи ослаблення дії вібрацій

Вплив структурних (корпусних) вібрацій на роботу РЕА може бути значно знижений застосуванням корпусів з подвійними стінками, з'єднаними перемичками. Одна зі стінок служить для сприйняття навантажень і додання корпусу необхідної жорсткості, а інша призначається для збільшення демпфіруючих властивостей корпусу і обмеження його звукопередавальної здатності.

Віброізолюючі властивості подвійної стінки зростають пропорційно збільшенню мас стінок. Результати великого числа дослідів вказують, однак, на зменшення демпфіруючої здатності зі збільшенням ваги на одиницю площі поверхні стінки. Це може бути пояснене тим, що передача вібрацій відбувається як основою корпусу, так і перемичками.

Зменшити дію вібрації на апаратуру можна застосуванням у конструкції матеріалів з великим коефіцієнтом поглинання. Завдяки значному коефіцієнту поглинання пориста гума, в порівнянні з іншими матеріалами, найбільш придатна для демпфірування коливань у широкому діапазоні частот.

Великий коефіцієнт поглинання мають також магнієві сплави.

6.4 Амортизатори

Одним з найбільш дієвих методів ослаблення вібрації є застосування амортизаторів.

Вони поділяються на:

- гумово-металеві - пластинчасті типу АП і чашкові типу АЧ;
- рівночастотні демпфірованого типу АД;
- амортизатори з фрикційним демпфіруванням типу АФД;

- амортизатори просторового навантаження типу АПН;
- суцільнометалеві амортизатори з матеріалу МР;
- середньочастотні пелюсткового типу;
- тросові амортизатори;
- пружинні амортизатори;
- комбіновані амортизатори.

6.4.1 Гумово-металеві амортизатори

6.4.1.1 Амортизатори пластинчасті типу АП и чашкові типу АЧ

Частота їх власних коливань при номінальному навантаженні становить 15...20 Гц у вертикальному напрямку і 30...35 Гц в горизонтальному напрямку.

Вони мають малу віброміцність і чутливі до дії низьких температур.

Віброізоляція апаратури в вертикальному напрямку починається з 25 Гц при амплітудах вібрацій не більше 0,5 мм.

При великих амплітудах вібрацій застосовувати ці амортизатори не рекомендується.

6.4.1.2 Амортизатори скобочного типу АМ

Власна частота амортизаторів АМ при номінальному навантаженні 20.. 30 гц у вертикальному напрямку і 35...45 гц в горизонтальному.

Амортизатори мають малу віброміцність і сильний розкид характеристик. Їм притаманні всі недоліки резино-металевих амортизаторів.

Однак завдяки простоті конструкції, малій вазі, значному (до 6 мм) прогину і великому номінальному навантаженні (до 120 кг) амортизатори АМ знаходять широке застосування.

6.4.1.3 Амортизатори стриженькові типу АН

Амортизатори працюють на вигин і на стиск. Мають мінімальні розміри і малу вагу, прості у виготовленні.

Власна частота навантажених амортизаторів 11...13 Гц у вертикальному і 6...8 Гц в горизонтальному напрямку.

Віброзахист починається з частоти 15 Гц при нормальній температурі і з 40 Гц при температурі 10°C і амплітуді вібрації до 0,5 мм.

6.4.1.4 Амортизатори опорні типу АО

Амортизатори працюють на стиск, мають малі розміри та малу вагу.

Власна частота при номінальному навантаженні 25...30 Гц.

Віброзахист здійснюється починаючи з частоти вібрації 25 Гц при амплітуді вібрації до 0,5 мм.

6.4.1.5 Амортизатори рожекові типу АР

Власна частота навантажених амортизаторів типу АР 11...12 Гц у вертикальному і горизонтальному напрямках.

Віброзахист здійснюється починаючи з частоти вібрацій 15 Гц в вертикальному і 20 Гц в горизонтальному напрямку при амплітуді вібрацій до 1 мм.

При температурах -50°C віброізоляція починається з частоти 30 Гц.

Амортизатори мають достатню віброміцність.

6.4.1.6 Амортизатори типу "втулка"

Вони мають просту компактну і надійну конструкцію, призначені для захисту деталей і апаратури малої ваги. Матеріалом для цих амортизаторів служить морозостійка високоеластична гума.

Характерною особливістю цих амортизаторів є однакова жорсткість за трьома осями, простота установки і відсутність склеювання гуми з арматурою.

Амортизатори застосовуються для віброізоляції на частотах вище 200 Гц.

6.4.2 Амортизатори рівночастотні демпфірованого типу АД

Амортизатори типу АД призначені для навантажень від 3 до 150 Н, що діють у вертикальному напрямку.

Власна частота навантажених амортизаторів становить 8...10 Гц.

Віброзахист за нормальних умов починається з частоти 12 Гц при амплітуді вібрації до 0,5...1,5 мм в залежності від номера серії амортизатора.

Інтервал робочих температур $-60 \dots + 70^{\circ} \text{C}$.

Коефіцієнт демпфірування амортизаторів знаходиться в межах 0,06...0,5.

Залежність навантаження від прогину має нелінійність, що досягає 10 ... 12%.

6.4.3 Амортизатори з фрикційним демпфіруванням типу АФД

Діапазон навантажень амортизаторів АФД становить від 3 до 200 Н.

Власна частота навантажених амортизаторів 15...20 Гц у вертикальному і 25...30 Гц в горизонтальному напрямку.

Коефіцієнт динамічності μ не перевищує 2.

Віброзахист апаратури починається з частоти вібрації 30 Гц для вертикальних і з 45 Гц для горизонтальних вібрацій.

Амортизатори забезпечують захист від ударних навантажень до 10 g і лінійних прискорень до 9 g в вертикальному напрямку.

Інтервал робочих температур $- 60 \dots + 150^{\circ} \text{C}$.

Амортизатор АФД має дві співвісні спіральні конусні пружини різної жорсткості. Жорсткість верхньої пружини менше жорсткості нижньої.

6.4.4 Амортизатори просторового навантаження типу АПН

Рівночастотні амортизатори типу АПН уявляють собою вдосконалену модель амортизаторів типу АФД і призначені для захисту РЕА від вібрації і ударів.

Основними амортизуючи ми елементами є дві однакові спіральні конусні пружини і фрикційний демпфер. Тривалі вібрації демпфіруються тертям сухарів о внутрішню поверхню циліндричного корпусу амортизатора. Поперечні вібрації гасяться за рахунок тертя демпферної втулки об опорні шайби.

Максимальне демпфірування здійснюється на резонансних частотах (10...20 Гц). При цьому коефіцієнт динамічності μ не перевищує 2,5.

Зі збільшенням частоти збуджуючих вібрацій коефіцієнт демпфірування зменшується, тобто амортизатор має змінний коефіцієнт демпфірування залежно від частоти збуджуючих вібрацій. Тому такі амортизатори можуть застосовуватися як для підвищення віброміцності, так і для підвищення вібростійкості РЕА.

Амортизатори можуть працювати в умовах вібрації будь-якого напрямку в діапазоні частот 30...200 Гц при максимальному прискоренні до 15 g, прискоренні удару до 12 g і лінійному прискоренні до 15 g.

Характеристики амортизатора зберігаються при температурі навколишнього середовища від -60 до + 150 ° С і відносній вологості до 98% при температурі + 40 ° С. Довговічність роботи амортизаторів не менше 500 год. без урахування часу зберігання.

При малих прискореннях (1 ... 2 g) прискорення, що передається на апаратуру, залишається приблизно на рівні 1 g, тобто ефективність амортизаторів типу АПН, так само як і АФД, при малих прискореннях значно знижується.

6.4.5 Суцільнометалеві амортизатори з матеріалу МР

Амортизатори цього типу повністю виготовляються з металу і містять пружні і демпфіруючі елементи, виготовлені з матеріалу, що має механічні властивості, близькі до властивостей гуми. Тому матеріал умовно називають «МР» - металева гума.

Спосіб виготовлення деталей з МР полягає в наступному. З металевого дроту навивають спіраль, яку дозують за вагою, розтягують до певного кроку, формують певним чином в заготовку і потім отримують готову деталь методом холодного пресування.

Деталі з МР можуть мати будь-яку конфігурацію, яку допускає пресування у пресформі (шайба, втулка, пластина, кільце, мембрана, конус, тор, куля, циліндр).

Отримані таким чином пружні елементи, що демпфірують, можуть застосовуватися в місцях з'єднань і стиків деталей і вузлів для демпфірування резонансних коливань, а також використовуватися в підвісці агрегатів, апаратури і механізмів для їх амортизації.

Механічні властивості пружно демпфіруючих елементів визначаються маркою і діаметром вихідного дроту, кроком і діаметром спіралі, способом укладання спіралі в заготовку і тиском пресування у пресформі.

На основі матеріалу МР розроблено кілька типів суцільнометалевих амортизаторів.

Перший з цих типів - *амортизатор ДК* - є просторовим, який сприймає вібраційні, ударні, статичні навантаження під будь-яким кутом до осі.

Другий амортизатор - *АЦМ* - опорного типу, виконаний за схемою відомого амортизатора Met-Z-Flex і зібраний в корпусі серійного амортизатора АПН.

Третій тип амортизатора - кільцевий - просторового навантаження.

Кріпильними елементами можуть бути наскрізні діаметрально розташовані болти, скоби, пістони в залежності від умов його монтажу на об'єкті.

Співвідношення жорсткостей в осьовому і перпендикулярному осі напрямках визначається співвідношенням його характерних розмірів - діаметра, товщини і ширини.

Амортизатор призначений для віброізоляції блоків малої ваги, (від 0,5 до 5 Н на один амортизатор) і може забезпечити власні частоти в межах від 10... 2 до 30...40 Гц з максимальним коефіцієнтом динамічності 3,5...4.

Можуть бути виготовлені *втулкові амортизатори* різноманітних конструкцій. Найбільш поширеним є **двопружинний втулковий амортизатор** з попереднім осьовим натягом пружних елементів. При цьому в межах натягу жорсткість всього амортизатора стає вдвічі вище, ніж жорсткість окремих пружних елементів, що входять до нього, а коефіцієнт розсіювання залишається тим же.

Величина необхідного натягу визначається параметрами діючої вібрації і демпфуванням амортизатора за умови відсутності періодичного розстикування його при резонансі.

6.4.6 Середньочастотні амортизатори пелюсткового типу

Амортизатори пелюсткової типу призначені для віброізоляції апаратури в груповому монтажі за гранями амортизованого блоку.

Власні частоти навантажених амортизаторів 10...12 Гц.

Віброізоляція забезпечується в діапазоні частот від 15 до 2000 Гц.

Демпфірування здійснюється внаслідок сухого тертя пелюсток пружини б прокладки, пресовані з капронового порошку (ВТУ МХП-88-59).

Інтервал робочих температур $-60^{\circ}\text{C} \dots +150^{\circ}\text{C}$.

Амортизатори забезпечують ударну міцність при прискоренні до 25 g з тривалістю імпульсу до 0,05 с.

Пелюсткові пружини виготовляють із сталеві нагартованої стрічки EI-816 і піддають дисперсійному твердненню до HRC 50-52.

Пелюсткові пружини встановлюються в зазорах між гранями кожуха амортизуемого блоку і корпусом. Один кінець пружини з'єднується клепою з кожухом, а інший вільно ковзає по поверхні блоку.

Кількість пелюсткових пружин залежить від ваги блоку і пружних характеристик пружин, але не повинна бути меншою чотирьох на кожній грані блоку. В іншому випадку можуть утворитися перекося блоку, і пружина буде стикатися не з площиною пелюстки, а з його краєм або ребром, і амортизації не буде.

Внаслідок тертя сталі об капрон і зменшення амплітуди вібрації зі збільшенням частоти, амортизатори мають нелінійну пружну характеристику і коефіцієнт демпфірування, що залежить від частоти вібрації. При великих значеннях частот коефіцієнт демпфірування стає незначним, і коефіцієнт динамічності прагне до розрахункового.

6.4.7 Тросові амортизатори

Вони мають ряд переваг перед іншими типами амортизаторів:

- широкий діапазон навантажень 10: 1, тобто амортизатор, розрахований для захисту маси в 1 кг, забезпечує захист від вібрації і маси в 10 кг;
 - великий коефіцієнт демпфірування, і тому коефіцієнт динамічності μ на резонансній частоті може не перевищувати 2;
 - рух амортизуємого блоку при дії ударного навантаження еліптичний замість поступального при звичайних амортизаторах, що дозволяє зменшити зазори між блоком і підставою;
 - захист від впливу вібрації забезпечується в усіх напрямках;
 - мале змінна характеристики при тривалій дії лінійних прискорень;
 - широкий інтервал робочих температур ($-72^{\circ}\text{C} \dots +260^{\circ}\text{C}$).
- Існують різновиди тросових амортизаторів:
- кутникові (АТГ, ПП);
 - сферичні;
 - пружна тросова підвіска;
 - амортизатори сходового типу.

6.4.8 Пружинні амортизатори

Пружинні амортизатори мають більш широкий діапазон частот віброізоляції і можуть застосовуватися для ослаблення вібрацій як низьких, так і високих частот.

Перевага сталевих пружинних амортизаторів полягає в тому, що коефіцієнт динамічності системи при великих частотах прагне до теоретичного, оскільки пружини мають малий коефіцієнт демпфірування, тобто забезпечують кращу віброізоляцію у нерезонансній області частот.

В області резонансних частот система пружинної амортизації має найбільші значення коефіцієнту динамічності і тому значно підсилює (в 10... 0 разів) амплітуди вібрації. Цей недолік необхідно враховувати при використанні пружинних амортизаторів.

Перевага сталевих пружин полягає також у тому, що вони довговічні, не схильні до шкідливої дії високої температури і кліматичних впливів.

Найчастіше в якості пружинних амортизаторів застосовуються сталеві циліндричні кручені пружини, що виготовляються з дроту круглого перетину.

6.4.9 Комбіновані амортизатори

Комбіновані пружинно-поролонові амортизатори застосовуються в тих випадках, коли коефіцієнт демпфірування η пружинних амортизаторів має недостатню величину для забезпечення необхідної резонансної амплітуди блоку. Потрібний коефіцієнт демпфірування η амортизаторів при заданому коефіцієнті динамічності μ на резонансній частоті визначається за формулою:

$$\eta \approx \frac{1}{2\mu}$$

Задаючись допускаються для кожного конкретного випадку значенням μ_p , можемо визначити необхідну величину коефіцієнта демпфірування η_p .

Підвищення коефіцієнту демпфірування амортизації можна досягти шляхом паралельного підключення до пружинних амортизаторів поролонових з великим коефіцієнтом демпфірування.

Жорсткість пружинно-поролонових амортизаторів визначається, виходячи з необхідних величин загальної жорсткості комбінованих амортизаторів k_x і загального коефіцієнта демпфірування η , а також значень коефіцієнтів демпфірування пружинних і поролонових амортизаторів окремо.

Стиснення поролонового амортизатора в вертикальному напрямку супроводжується розширенням його в поперечному. На опорних торцевих поверхнях поролон приклеюється, внаслідок цього частина поролону, прилегла до торців, не бере участі в утворенні осадки амортизатора. Тому при визначенні жорсткості поролонового амортизатора враховується не вся його висота H , а тільки висота деформуємої частини, тобто робоча висота, яка приблизно менше повної висоти H на 0,25 поперечного розміру A .

Пружинно-поролонові амортизатори мають коефіцієнт динамічності, близький до теоретичного, тому забезпечують хорошу віброізоляцію апаратури.

7. ТЕМПЕРАТУРНІ ВПЛИВИ НА РЕА

7.1 Поняття теплового режиму

Вплив коливань температури на РЕА обумовлений сезонними і добовими змінами температури навколишнього середовища.

Зовнішні температурні фактори можуть діяти як самостійно при зберіганні РЕА, так і в поєднанні з її власним тепловим режимом.

Тепловий режим характеризується сукупністю температур окремих точок - температурним полем. Температурний режим створюється як зовнішнім температурним впливом навколишнього середовища, так і тепловою енергією, що виділяється радіoeлементами самої апаратури.

Залежно від стабільності в часі тепловий режим може бути **стаціонарним** або **нестаціонарним**.

Незмінність температурного поля в часі характеризує **стаціонарний режим**. Залежність температурного поля від часу характерна для **нестаціонарного режиму**. Цей режим має місце в тих випадках, коли власна теплоємність апарату порівнянна з кількістю теплоти, що виділяється при роботі. Зазвичай нестаціонарний режим має місце при одиночних і короткочасно повторюваних теплових навантаженнях.

За характером спрямованості теплового потоку поділяють **термоактивні** і **термопасивні** елементи. Термоактивні елементи служать джерелами теплової енергії, а термопасивні - її приймачами. Термопасивні елементи, в свою чергу можуть бути **термокрітичними** і **не термокрітичними**.

Нормальний тепловий режим - це режим, який при зміні в певних межах зовнішніх температурних впливів забезпечує зміну параметрів і характеристик конструкції, компонентів, матеріалів в межах, зазначених в технічних умовах на них.

Висока надійність і тривалий термін служби виробу будуть гарантовані, якщо температура середовища всередині РЕА є нормальною і дорівнює $+ 20-25^{\circ} \text{C}$. Зміна температури відносно нормальної на кожні 10°C в будь-яку сторону зменшує термін служби апаратури приблизно в 2 рази.

7.2 Вплив підвищених температур

При *підвищенні температури* відбуваються фізичні зміни матеріалів, порушення процесів, що в них протікають, погіршення ізоляційних властивостей. Відбувається інтенсивне старіння матеріалів з втратою механічних і електричних властивостей.

Найбільш критичними до підвищених температур є напівпровідникові прилади і мікросхеми, в основі роботи яких лежать р-п переходи. При досягненні певної температурної межі в р-п переході настає тепловий пробій - явище необоротне і приводить до повного виходу з ладу даного елемента або мікросхеми. Для елементної бази на кремнієвій основі допустимі температури не перевищують $+110 \dots +115^{\circ}\text{C}$, для германієвої - $+70 \dots +80^{\circ}\text{C}$.

При ще більшому підвищенні температури до точки Кюрі (різної для різних матеріалів) відбувається розмагнічування феромагнетиків. При зниженні температури нижче точки Кюрі їх властивості відновлюються, однак це може привести до втрати інформації.

Під час тривалої експлуатації при високих робочих температурах багато сучасних матеріалів на органічній основі, скло і кераміка зазнають структурних змін.

У сплавів з високим електричним опором завжди нелінійно змінюється провідність, при високих температурах стає нелінійним коефіцієнт температурного розширення, діелектричні втрати і діелектрична проникність матеріалів з підвищенням температури, як правило, збільшуються.

Підвищена температура знижує діелектричні властивості матеріалів, прискорює корозію конструкційних і провідникових матеріалів.

Сучасна апаратури тісно пов'язана з використанням досить великих потужностей в порівняно малих обсягах. Це призводить до різкого збільшення щільності потужності розсіювання, а, отже, і щільності теплоти, що розсіюється. Тому при конструюванні апаратури особливого значення набуває розробка методів відведення теплоти, регулювання та контролю температури.

Питання забезпечення нормальних теплових режимів РЕЗ і способів їх охолодження докладно розглядаються в рамках дисципліни "Тепломасообмін в ЕА".

7.3 Вплив знижених температур

При *зниженій температурі* зменшуються підсилювальні властивості транзисторів, розряджаються акумуляторні батареї, в реле спостерігається злипання контактів. Електролітичні конденсатори замерзають і перестають працювати.

Підвищується крихкість більшості матеріалів, що сприяє збільшенню крихкості металевих і пластмасових конструкцій РЕА, зниженню їх стійкості до вібраційних ударних впливів.

Гумові амортизатори втрачають свою еластичність і перестають працювати, віск і захисні компаунди тверднуть і розтріскуються, в механічних вузлах спостерігається замерзання мастила.

Різні коефіцієнти лінійного розширення матеріалів можуть призвести до руйнування залитих компаундами конструкцій і, як наслідок, порушення електричних з'єднань, зміни характеру посадок, ослаблення кріплень та ін.

Працездатність при низьких температурах забезпечується саморозігрівом апаратури перед роботою або, при необхідності, нагріванням електричними нагрівальними елементами, що для стаціонарної апаратури встановлюються в приміщенні (що має бути обумовлено в інструкції з експлуатації), а для транспортуємої вбудовуються в конструкцію. При застосуванні нагріву має забезпечуватися автоматичне вимикання нагрівачів після прогріву апаратури. Слід уникати інтенсивного прогрівання, оскільки при цьому пари води всередині приладу конденсуються на поверхнях конструкції до тих пір, поки надмірна волога не осяде в повітрі.

7.4 Тепловий удар

Тепловий удар - це різка зміна температури навколишнього середовища, при якій час зміни температури обчислюється хвилинами, а її перепад - десятками градусів. Найбільш сильно тепловий удар проявляється в елементах конструкції, де є локальні механічні напруги, сприяючи утворенню мікротріщин. Від теплового

удару в першу чергу руйнуються крихкі матеріали - скло, кераміка, деякі пластмаси.

Реакція ЕРЕ, напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем на тепловий удар пов'язана з температурною залежністю їх електричних параметрів.

При коливаннях температури за рахунок температурних коефіцієнтів змінюються електричні параметри більшості ЕРЕ: опору, ємності, індуктивності. Знижується опір ізоляції, змінюється власна ємність, добротність контурів і опір резисторів. В результаті порушується настройка РЕМ, знижується чутливість і вибірковість радіоприймальних пристроїв.

Тепловий удар викликає механічні напруги в місцях пайки та інших рухомих з'єднаннях, розтріскування металевих і неметалевих покриттів.

У разі різних ТКЛР матеріалів виникає внутрішня напруга, що призводить до деформацій конструкцій і викликає обриви провідників і електричних з'єднань.

Якщо при розробці несучих конструкцій не будуть враховані зміни лінійних розмірів при змінах температури, то при експлуатації можливе заклинювання або деформація зв'язків.

8. КЛІМАТИЧНІ ВПЛИВИ НА РЕА

8.1 Вологість

8.1.1 Вплив вологості на працездатність РЕА

Вологість - один з найбільш агресивних факторів, що впливають, який проявляє себе при зануренні апаратури в воду, впливі крапель дощу і бризок, водяної пари, утворення роси і інею.

Від прямого впливу вологи стаціонарна і транспортуєма РЕА, як правило, не захищена і не повинна експлуатуватися в цих умовах. Однак на працюючу апаратуру впливають пари вологи навколишнього повітря. Нормальною вологістю вважається відносна вологість 60 ... 75% при температурі 20 ... 25°C.

Випадання роси (конденсація на холодних поверхнях конструкції) викликається зниженням температури, яке практично завжди має місце при відключенні і наступному зберіганні апаратури. Наприклад, якщо протягом дня вологість всередині РЕА становила 70%, то точка роси виявляється всього на 5°C нижче температур, які мали місце всередині РЕА.

Інтенсивне нагрівання переохолодженої апаратури перед переведенням її в робочий стан також призводить до конденсації вологи на холодних елементах конструкції. Краплі конденсату будуть стікатися і збиратися в місцях «пасток вологи». В результаті апаратура буде перебувати під постійним впливом вологи.

Адсорбція води на поверхні елементів РЕА сприяє корозії металевих деталей, старінню неметалів, зміні електричних характеристик ізоляторів. Здатність води змочувати поверхню і проникати в пори матеріалів і мікротріщини збільшується з підвищенням температури.

Вологість досить негативно впливає на роботу РЕА.

При **зниженій вологості** спостерігається висихання діелектриків і їх розтріскування.

За 3 - 4 роки експлуатації при відносній вологості нижче 20% і температурі +30°C повністю висихає ізоляція проводів, в результаті чого вона стає ламкою, змінює властивості.

При *підвищеній вологості* відбуваються побічні фізико-хімічні процеси в діелектриках і металах, які викликають небажані зміни ємності конденсаторів, зменшення опору ізоляції, іскріння, пробій, розбухання і відшаровування діелектриків, корозію металів, появи цвілі всередині апаратури.

Істотним є вплив вологості на електричні з'єднання. При підвищеній вологості короғують провідники, на різних контактах з'являються нальоти, які погіршують їх якість, відмовляють паяні з'єднання, особливо якщо вони забруднені. З плином часу пухка окісна плівка може виявитися в гніздових контактах з'єднувачів, що призводить до відмов, які важко усунути.

Шаруваті діелектрики, поглинаючи вологу, змінюють параметри та характеристики. Виникнення на друкованих платах водяної плівки призводить до зниження опору ізоляції діелектриків, появи струмів витоку, електричних пробіів, механічних руйнувань внаслідок набрякання-висихання матеріалу. Через поглинання вологи значно зменшується електрична міцність, що особливо позначається на працездатності високовольтних вузлів.

Вологість прискорює руйнування лакофарбових покриттів, порушує герметизацію і цілісність заливки елементів вологозахисними матеріалами.

Тривалий вплив високої вологості викликає корозію металевих конструкцій, набухання і гідроліз органічних матеріалів. Продуктом гідролізу є органічні кислоти, що руйнують органічні матеріали і викликають інтенсивну корозію металевих несучих конструкцій.

Наявність у вологому атмосфері промислових газів і пилу призводить до прогресуючої корозії.

Вплив вологи може багаторазово посилитися через створення сприятливих умов для утворення цвілі.

Волога в атмосфері міститься в пароподібному стані і у вигляді розчинів солей і кислот. Осідаючи на поверхні корпусів приладів, вона утворює плівку електроліту. Хімічні реакції, що протікають при цьому, прискорюються під впливом світла і електричних полів. Корозія металевих елементів корпусів приладів призводить до зниження їх механічної міцності. Об'ємна корозія, пов'язана з проникненням вологи в пори і мікротріщини, призводить до порушення герметичності корпусів приладів.

Вода в атмосфері завжди забруднена активними речовинами -

вуглекислими і сірчистими солями кальцію, магнію, заліза, хлористим кальцієм, газами - що сприяє прояву корозії. Особливо небезпечна морська вода, що є вельми активним хімічною сполукою. Вона легко взаємодіє з рідинами, газами, твердими речовинами. Це активний каталізатор, тому багато хімічних реакцій істотно прискорюються в присутності навіть незначної кількості води.

Процес **корозії металів** має хімічну або електрохімічну природу, але їх причина однакова: перехід металу в більш стабільний природний стан. Процес корозії пов'язаний з віддачею енергії, що вказує на мимовільний хід реакції, без витрати енергії ззовні. Процес хімічної корозії протікає без участі вологи. При електрохімічній корозії розчинення металу і виникнення нових з'єднань відбувається за участю електроліту, т. Е. Води.

Розрізняють три види корозії: **рівномірну, нерівномірну і міжкристалічну**.

При **рівномірній корозії** процес поширюється поступово від окремих корозуючих місць по всій поверхні металу.

Нерівномірна корозія обмежується окремими місцями і виникає, наприклад, внаслідок порушення захисного покриття.

Корозія міжкристалічна характеризується проникненням в глиб металу шляхом розриву структури і поширенням уздовж меж кристалів. Наявність в атмосфері кислот, лугів, солей прискорює процеси корозії.

Вплив агресивної атмосфери на ізоляційні матеріали виражається в поглинанні ними вологи, погіршенні діелектричних властивостей і поступовому руйнуванні. Ізоляційних пластмас, що не поглинають вологи, не існує. Кількість вологи, що проникає, і час її проникнення неоднакові для різних матеріалів.

Проникнення вологи в ізоляційні матеріали може бути **капілярним і дифузійним**.

Капілярне проникнення має місце в разі наявності в матеріалі грубих мікроскопічних пір, тріщин та інших дефектів. Оскільки в мікроелектроніці застосовують тільки високоякісні ізоляційні матеріали, то вони практично не мають таких дефектів.

Істотно більше значення має процес **дифузійного проникнення**, який полягає в заповненні проміжків між молекулами матеріалу молекулами води. При цьому переміщення молекул води відбувається в бік меншої їх концентрації. При підвищеній вологості

молекули води проникають всередину матеріалу (поглинання вологи), а в сухий теплій атмосфері - з матеріалу (висихання). Поглинання вологи діелектриком веде до зменшення його опору, збільшення діелектричних втрат, набухання, механічних пошкоджень.

Слід зазначити, що розглянуті вище фактори діють, як правило, в комплексі, підсилюючи один одного і несприятливо впливаючи на надійність апаратури, викликаючи певного виду відмови того чи іншого механізму.

Зовнішні фактори в поєднанні з електричними і тепловими режимами роботи приладів одночасно впливають на всі елементи апаратури, прискорюючи в них деградаційні процеси. Вірогідні випадки, коли швидше виходять з ладу або змінюють свої параметри такі елементи, як резистори, конденсатори, провідники і ізоляційні покриття. Вихід з ладу або значна зміна електрофізичних параметрів цих елементів може порушити режим живлення напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем або привести до їх відмов.

8.1.2 Захист РЕА від підвищеної вологості. Захисні покриття

Захист апаратури від впливу вологості здійснюється відповідними матеріалами, покриттями, застосуванням посиленої вентиляції сухим повітрям, підтриманням всередині виробів більш високої температури, ніж температура навколишнього середовища, використанням поглиначів вологи, розробкою герметичній апаратури.

Корозія протікає більш інтенсивно при контактуванні матеріалів з істотно різними електрохімічними потенціалами. Метал з негативним потенціалом гальванічної пари буде руйнуватися тим швидше, чим більша різниця електрохімічних потенціалів.

Якщо з тих чи інших причин неможливо замінити метали з високою різницею електрохімічних потенціалів, то на них наносяться покриття, які за призначенням ділять на три групи: **захисні, захисно-декоративні і спеціальні.**

Захисні покриття призначені для захисту деталей від корозії, старіння, висихання, гниття і інших процесів, що викликають вихід апаратури з ладу.

Захисно-декоративні покриття поряд із забезпеченням захисту деталей надають їм гарний зовнішній вигляд.

Спеціальні покриття надають поверхні деталей особливі властивості або захищають їх від впливу особливих середовищ.

За способом отримання все покриття поділяють на **металеві та неметалеві**.

Металеві покриття - покриття, нанесені гарячим способом, гальванічні, дифузійні і металеві на діелектриках.

Вони утворюють з основним матеріалом деталі контактну пару. Залежно від полярності потенціалу розрізняють покриття анодні (негативний потенціал покриття по відношенню до основного металу) і катодні (позитивний потенціал покриття).

При корозії може руйнуватися як основний метал деталі, так і покриття. Руйнування відбувається через наявність пір в покриттях, пошкоджень у вигляді відколів, подряпин, тріщин, що виникають в процесі експлуатації, і будуть тим інтенсивніше, чим більша різниця електрохімічних потенціалів між основним металом і покриттям. При анодному покритті внаслідок корозії руйнується саме покриття, при катодному - основний метал.

Найбільш поширені матеріали покриттів - нікель, мідь, цинк, кадмій, олово і срібло. Товщина покриття обирається в залежності від матеріалу і способу нанесення покриття. Для поліпшення механічних і захисних властивостей покриттів рекомендуються застосовувати багатошарові покриття з різномірних матеріалів. Товщина покриття зазвичай дорівнює 1-15 мкм.

Оксидування - отримання окисної плівки на сталі, алюмінії і його сплавах. Покриття має гарний зовнішній вигляд, антикорозійні властивості, але воно мікропористе і нетривке. Остання властивість покриття дозволяє використовувати його як ґрунт під фарбування.

Анодування - декоративне покриття алюмінію та його сплавів електрохімічним способом. Захисна плівка хімічно стійка, має високі електроізоляційні властивості, надійно захищає від корозії, може бути пофарбована.

Фосфатування - процес створення на сталі захисної плівки з високими антикорозійними і електроізоляційними властивостями, гарною адгезією. Одержуване покриття пористе і недостатньо міцно. Фосфатні плівки використовуються як ґрунт під фарбування.

Неметалеві покриття - покриття лаками, емалями, ґрунтівками, а також антикорозійне покриття пластмасами.

Лакофарбові покриття захищають деталі від корозії. Їх недоліком є низька механічна міцність і термостійкість. Цей вид покриття застосовується для фарбування каркасів, кожухів, передніх панелей приладів та ін. Якісний зовнішній вигляд виробу забезпечується багатошаровим фарбуванням. Товщина лакофарбового покриття коливається від 20 до 200 мкм.

Розрізняють такі види лакових покриттів для захисту від відповідних видів зовнішнього впливу:

- водостійкі - морська, прісна вода і її пари;
- спеціальні - опромінення, глибокий холод, відкрите полум'я, біологічні впливи та ін.;
- маслобензостійкі - мінеральні масла і мастила, бензин, гас;
- хімічно стійкі - різні хімічні реагенти, агресивні гази, пари і рідини розчини кислот і солей;
- термостійкі - температура вище +60 ° С;
- електроізоляційні - електричний струм, коронні і поверхневі розряди.

Недоліком лакових покриттів є те, що вони вимагають високої чистоти виробничих процесів і ускладнюють заміну компонентів. При експлуатації покриття сколюються, лущаться і забруднюють контакти електричних з'єднувачів. Пари води, потрапляючи під покриття, конденсуються і зменшують електричний опір між роз'єднаними ланцюгами. При висиханні покриття утворюються мости з лаку між поруч розташованими виводами компонентів, які передають механічні напруження на виводи і паяні з'єднання, збільшуючи ймовірність відмови паяних контактів.

Вибір того чи іншого виду покриття в кожному конкретному випадку залежить від матеріалу деталі, її функціонального призначення та умов експлуатації.

8.1.3 Герметизація

Герметизація - найбільш дієвий спосіб захисту не тільки від підвищеної вологості, але і від ряду інших кліматичних факторів, в тому числі пилу і шкідливих речовин навколишнього середовища.

Методи герметизації розрізняються в залежності від того, захищається виріб в цілому, або його окремі вузли і компоненти.

Модулі конструкції першого рівня захищають **покриттям лаком, заливанням** епоксидними смолами, **просоченням**, особливо моткових виробів, **обпресуванням** герметизуючими компаундами на основі органічних (смол, бітумів) або неорганічних (алюмофосфату, металлометафосфатов) речовин. Герметизація компаундами покращує електроізоляційні та механічні характеристики модуля. Однак низька теплопровідність більшості компаундів погіршує відведення теплоти і ускладнює ремонт.

Просочення виробів являю собою заповнення наявних в них каналів електроізоляційним матеріалом. Одночасно з заповненням каналів при просочуванні на всіх елементах конструкції утворюється тонкий ізоляційний шар, що захищає від впливу агресивного середовища. Одночасно з захисними функціями просочувальний матеріал підвищує електричну міцність виробу, скріплює механічно його окремі елементи, у багатьох випадках покращує теплопровідність. Просочення здійснюють зануренням виробів в рідкий ізоляційний матеріал. Після вилучення виробу матеріал твердне. Процес затвердіння може відбуватися при нормальній температурі або з зовнішнім підігрівом. При використанні просочувальних матеріалів, що полімеризуються, необхідно застосовувати спеціальні прискорювачі.

При герметизації **заливанням** всі вільні порожнини в виробі, в тому числі і простір між елементами і корпусом, заливають електроізоляційним матеріалом, який після затвердіння утворює досить товстий захисний шар. Заливку виробу можна проводити в його постійному корпусі або використовувати для цього спеціальні роз'ємні форми, які після затвердіння матеріалу видаляються.

Герметизація **обволіканням** за технікою виконання аналогічна операції просочення, однак тут використовують в'язкі ізоляційні матеріали, що мають добру адгезію до елементів виробу. Шар матеріалу, що утворюється на поверхні деталей, порівняно товстий (від доль до декількох міліметрів) і надійно захищає їх від впливу агресивного середовища.

Повна герметизація або захист виробів непроникними для газів оболонками - найбільш досконалий спосіб захисту вузлів і

пристроїв РЕА, оскільки крім ефективного захисту він також дає можливість розгерметизації в виробничих умовах і при експлуатації для виконання ремонту виробів.

Однак цей метод є і більш дорогим, оскільки при цьому виникає необхідність в розробці спеціальних корпусів, способів герметизації зовнішніх електричних з'єднувачів, елементів управління і індикації. Стінки виробів, що герметизуються, повинні протистояти значним зусиллям через різницю тисків всередині і зовні виробу. У результаті збільшення жорсткості конструкції зростає її маса і розміри.

Умови нормальної роботи виробів, захищених вакуумно-щільною герметизацією, залежать не тільки від якості герметизації, але і від захисту від агресивних компонентів, що входять в матеріали і середовище об'єму, що захищається. Виділення вільних молекул води та інших агресивних речовин в герметизованому об'ємі виробу може звести до мінімуму ефективність вакуумно-щільної герметизації. При розробці герметичних корпусів слід враховувати умови експлуатації і, перш за все, зміну барометричного тиску, зовнішні механічні впливи і можливі перепади температури.

Вакуумно-щільна герметизація може бути виконана з нероз'ємними і роз'ємними швами. Першу використовують для захисту малогабаритних вузлів і пристроїв, другу - для порівняно великих блоків, що вимагають профілактичної перевірки і які потребують зміни її окремих елементів.

Нероз'ємні герметичні конструкції роблять зі швами, виконуваними пайкою, зварюванням, заливанням, склеюванням або замазкою спеціальними компаундами (герметиками). У різних герметичних конструкціях між деталями, що сполучаються поміщають еластичну прокладку, а у герметизуємий об'єм - вологопоглинач, наприклад силікагель, хлористий кальцій, фосфорний ангідрид. Вони вбирають вологу до певної межі. Наприклад, силікагель поглинає близько 10% вологи від своєї сухої маси.

Умова непроникності такого герметичного з'єднання - збереження в увесь час його служби контактного тиску між прокладкою і поверхнями, що сполучаються. Для цього широко застосовуються пружні ущільнювальні прокладки (металеві та гумові) для всіх елементів конструкції по периметру виробу. Прохід повітря через ущільнення при стисканні прокладки на 25...30% від її

початкової висоти відбувається тільки за рахунок дифузії. При стягуванні гвинтами металеві прокладки деформуються при перевищенні межі плинності. При використанні гумових прокладок ущільнення досягається дією залишкових пружних деформацій.

Матеріалом прокладок служить гума, що має високу еластичність, піддатливість і здатність проникати в найдрібніші поглиблення і нерівності. Волога з часом проникає через всі органічні матеріали, тому вироби з прокладками з органічних матеріалів забезпечують захист від водяної пари лише на протязі кількох тижнів.

В особливих випадках прокладки виготовляють з міді та нержавіючої сталі з алюмінієвим або індієвий покриттям. Такі прокладки найчастіше виконуються трубчастими із зовнішнім діаметром 2-3 мм при товщині стінок 0,1...0,15 мм. Зусилля підтискання при герметизації металевими прокладками становить 20...30 кг на 1 см довжини прокладки.

При жорстких вимогах до герметичності корпусу виробу герметизацію виконують зварюванням або паянням по всьому периметру корпусу. Конструкція корпусу виробу повинна допускати неодноразове виконання операцій розгерметизації / герметизації. У поглиблення корпусу встановлюється прокладка з жаростійкої гуми, на яку укладається сталевий луджений дріт, який припаюється до корпусу, утворюючи шов. У разі розгерметизації виробу шов нагрівають, і припій разом з дротом видаляється.

При герметизації внутрішній обсяг герметизуємої апаратури заповнюється інертним газом (аргоном або азотом) з невеликим надлишковим тиском. Закачування газу всередину корпусу здійснюється через клапани-трубки з подальшою герметизацією. Продування азотом забезпечує очистку порожнини корпусу від водяної пари.

Елементи управління та індикації герметизуються гумовими чохлами, мембранами, електричні з'єднувачі - установкою на прокладки, заливкою компаундами.

Вибір способу герметизації визначається умовами експлуатації, застосовуваними матеріалами та покриттями, вимогами до електричного монтажу. Остаточне рішення про вибір способу герметизації приймається після проведення натурних випробувань РЕА в камерах вологості.

8.2 Атмосферний тиск

Підвищений атмосферний тиск в першу чергу механічно впливає на елементи конструкції РЕА.

Однак більш істотним є вплив **зниженого атмосферного тиску**.

В умовах зниженого атмосферного тиску працює, як правило, авіаційна, ракетна і космічна РЕА.

Вплив зниженого тиску на працездатність РЕА проявляється через такі явища:

- зменшується електрична міцність повітряних проміжків;
- погіршуються умови теплообміну конвекцією, що викликає додаткові перегріву виробів;
- в герметичних блоках виникають додаткові механічні напружки в стінках, кришках і деталях кріплення за рахунок перепаду тисків.

У таблиці 8.1 наведені залежності робочих значень атмосферного тиску p і коефіцієнта відносної електричної міцності повітряних проміжків K_E від висоти над рівнем моря H .

Таблиця 8.1 - Залежності робочих значень атмосферного тиску p і коефіцієнта відносної електричної міцності повітряних проміжків K_E від висоти над рівнем моря H

H , км	1	2	3	4	6	8	10
p , мм рт.ст.	674	596	526	462	354	267	199
K_E	1	0,9	0,8	0,72	0,56	0,45	0,35

Продовження табл. 8.1

H , км	12	14	16	18	20	26	31
p , мм рт.ст.	145	106	78	57	41	16	7,7
K_E	0,3	0,25	0,19	0,14	0,1	0,05	0,03

Зменшення конвективної теплопередачі призводить до зменшення електричної міцності через підвищення температури вузлів і температури навколишнього їх обсягу (середовища).

Коефіцієнт зниження напруги поверхневого покриття в інтервалі температур $+20, +150^{\circ}\text{C}$ при всіх значеннях атмосферного тиску від 760 мм рт.ст. до 3 мм рт.ст. близький до температурного коефіцієнту зміни щільності повітря і може бути оцінений наступною формулою:

$$K_T = \frac{T + t_n}{T + t_{ном}} \quad (8.1)$$

де: T - температура поверхні плати, вузла та ін.;

t_n - температура оточуючого повітря в нормальних умовах;

$t_{ном}$ - температура оточуючого повітря в номінальних умовах;

Обидва зазначені фактори при зниженому атмосферному тиску можуть значно зменшити діапазон робочих напруг в радіоелектронних пристроях.

8.3 Пил та пісок

Пил та пісок знаходяться в атмосфері і рухаються разом з повітряним потоком.

Пил - суміш твердих частинок малої маси, що знаходиться в повітрі в підвішеному стані. Крім того, до складу пилу входять як неорганічні (зола, сажа), так і органічні частки текстильного і рослинного походження. Сухі частинки внаслідок адсорбції іонів можуть бути заряджені і осідають на деталях, які перебувають під напругою.

Частинки пилу мають розміри від 5 до 200 мкм, можуть бути абразивними і гігроскопічними. При високій вологості (понад 75%) пил, вбираючи вологу, стає провідником, а при малій величині вологості (5-10%) частки пилу електрично заряджаються.

Пісок складається з округлених частинок кварцу розміром 0,06...0,08 мм, концентрація його збільшується зі збільшенням

швидкості руху мас повітря.

Розрізняють пил природний, що завжди присутній в повітрі, і технічний, що є наслідком зносу обладнання, обробки матеріалів, спалювання палива та ін. Поблизу міст і ТЕЦ зміст їх збільшується, причому більшу частину складають продукти згоряння сірки.

При відносній вологості повітря вище 75% і нормальній температурі спостерігається зростання числа частинок пилу, їх коагуляція, зростає ймовірність притягування пилу до нерухомих поверхонь.

При низькій вологості частинки пилу електрично заряджаються, неметалеві - позитивно, металеві - негативно. Заряд частинок найчастіше виникає через тертя.

Вплив пилу і піску помітно позначається на роботі наземної РЕА, особливо, транспортної. Осідаючи на поверхні деталей, пил і пісок, що містяться в атмосфері, знижують надійність роботи РЕА, можуть стати причиною виникнення в ній несправностей.

Пил, потрапляючи в мастильні матеріали і прилипаючи до ковзних поверхонь деталей електромеханічних вузлів, призводить до прискореного їх зносу.

Під впливом пилу змінюються параметри і характеристики магнітних стрічок, дискет, магнітних головок, дряпається і приходить до непридатності магнітний шар.

Пил в зазорах контактів перешкоджає замиканню контактів реле.

Пил, що осідає на поверхні деяких металів, небезпечний через свою гігроскопічність, оскільки вже при відносно невеликій вологості він істотно підвищує швидкість корозії.

Пил з поглиненими ньому розчинами кислот досить швидко руйнує навіть дуже хороші фарби. У тропічних країнах пил часто є причиною зростання цвілі.

Злежалий в процесі тривалої експлуатації на поверхні компонентів пил знижує опір ізоляції, особливо в умовах підвищеної вологості, призводить до появи струмів витоків між виводами, що дуже небезпечно для мікросхем. Діелектрична проникність пилу вище діелектричної проникності повітря, що визначає завищення ємності між виводами компонентів і, як наслідок, збільшення ємнісних перешкод.

Пил, що осідає, знижує ефективність охолодження виробів, утворює на поверхнях друкованих плат, не захищених лаковим покриттям, струмопровідні перемички між провідниками.

Електростатично заряджений сухий пил збільшує небезпеку ураження від електричного розряду високовольтних джерел напруги електронно-променевих трубок та ін.

Вологий пил знижує на кілька порядків поверхневий опір ізоляції діелектриків, сприяє розвитку пробою і корозії металів, особливо, з домішкою сажі, що адсорбує ангідрид 50г .

Крім того, пил, що знаходиться в повітрі, сприяє витоку зарядів і може викликати пробій проміжку, що знаходиться між контактами з високим потенціалом. Стандартами визначено три рівня концентрації пилу: $0,18$; $1,0$; $2,0 \text{ г / м}^3$.

Пилонепроникність РЕА або окремих її пристроїв може бути досягнута установкою їх в герметичні корпуси. Однак при цьому зростає вартість РЕА та погіршується температурний режим.

Якщо корпус РЕА виконаний з перфораціями, пил разом з повітрям проникне всередину РЕА природним шляхом або разом з повітряними потоками від вентиляторів. Зменшити попадання пилу всередину РЕА можливо установкою на вентиляційні отвори сіток з мілкими комірками та протипилових фільтрів.

9. РАДІАЦІЙНІ ТА БІОЛОГІЧНІ ВПЛИВИ НА РЕА

9.1 Радіаційні впливи

Радіаційний вплив викликає як негайну, так і накопичуючу реакцію елементів конструкцій РЕА.

9.1.1 Електромагнітне та іонізуюче випромінювання

Серед існуючих видів випромінювань найбільшу небезпеку становлять *електромагнітне випромінювання і іонізуючі частинки* високих енергій.

Повний спектр електромагнітних випромінювань охоплює діапазон довжин хвиль від десятків тисяч метрів до тисячних часток нанометра. Найбільш істотно впливає на РЕА гамма і рентгенівське випромінювання (довжина хвиль менше 10 нм). Ці види випромінювання мають значну проникаючу та іонізуючу здатності.

Істотно впливають на конструкцію РЕА також заряджені частинки: $\square$ альфа, бета і протони, а також нейтрони, що мають високу проникаючу здатність.

Опромінення частинками може викликати в матеріалах *зворотні, напівзворотні і незворотні явища*.

Зворотні явища виникають з початком опромінення, зберігаються протягом його дії і зникають з його припиненням.

Напівзворотні явища виникають з початком опромінення, збільшуються з його дією і поступово зникають після його припинення.

Незворотні явища виникають в процесі впливу певної дози опромінення, не зникають і не зменшуються після його припинення.

Найбільш стійкі до впливу опромінення метали. Так, інтегральний потік нейтронів величиною 10^{20} частинок/см² на властивості більшості металів практично не впливає. Однак слід враховувати, що у більшості металів при опроміненні знижується межа плинності в 2-3 рази, ударна в'язкість зменшується, питомий опір зростає на 20 ... 30%.

Найменшу радіаційну стійкість мають магнітні матеріали і

електротехнічні стали. Деякі метали, наприклад марганець, цинк, молібден та ін. після опромінення нейтронами самі стають радіоактивними.

Вплив випромінювання на полімери призводить до руйнування міжмолекулярних зв'язків, утворення зернистих структур і мікротріщин. У результаті полімерні деталі втрачають еластичність, стають крихкими.

При опроміненні резисторів виникають зворотні і незворотні зміни опору, рівень шуму збільшується, параметр вологостійкості зменшується. Керамічні та дрітні резистори найбільш стійкі до дії опромінення. Інтегральний потік величиною до 10^{20} частинок/см² майже не викликає змін їх параметрів. Менш стійкі до опромінення метало плівкові і плівкові вуглецеві резистори. Їх параметри помітно погіршуються при інтегральному потоці понад 10^6 частинок/см². Так само чутливі до опромінення і композиційні резистори.

Опромінення конденсаторів погіршує їх електричну міцність, змінює ємність і тангенс кута діелектричних втрат. Причиною цього є незворотні явища в структурі діелектрика, механічні деформації, іонізація діелектрика і повітряних проміжків. Найбільш стійкими до опромінення є керамічні, склоемалеві і слюдяні конденсатори. Конденсатори з органічним діелектриком (паперові, полістиролові, лавсанові, фторопластові та ін.) мають знижену радіаційну стійкість. Електролітичні конденсатори мають найнижчу стійкість, в них розгерметизація і розкладання електроліту наступають при низьких дозах опромінення.

Найменш стійкими до опромінення є напівпровідникові прилади і інтегральні мікросхеми. Незворотні дефекти в напівпровідниках приводять до втрати випрямних властивостей діодів, транзистори всіх типів при опроміненні втрачають підсилювальні властивості, в них зростають струми витоку, пробивна напруга знижується. Їх стійкість до радіації становить $10^{12} \dots 10^{14}$ нейтронів/см² при опроміненні нейтронами і $10^4 \dots 10^7$ рад при гамма-опроміненні.

В інтегральних мікросхемах при опроміненні істотно змінюються характеристики внаслідок зміни параметрів елементів, що входять до них: резисторів, конденсаторів, діодів, транзисторів. Так само змінюються ізолюючі властивості розділових р-п-переходів, зростають струми витоку, з'являються численні паразитні зв'язки між

елементами структури мікросхем, що в результаті призводить до порушення їх функціонування.

9.1.2 Сонячна та космічна радіація

Сонячна радіація - електромагнітне і корпускулярне випромінювання Сонця.

Електромагнітна складова сонячної радіації поширюється зі швидкістю світла і проникає в земну атмосферу. До земної поверхні сонячна радіація доходить у вигляді прямої і розсіяної радіації. Спектральний діапазон електромагнітного випромінювання Сонця дуже широкий - від радіохвиль до рентгенівських променів - проте максимум його інтенсивності припадає на видиму (жовто-зелену) частину спектру.

Існує також **корпускулярна частина** сонячної радіації, що складається переважно з протонів, які рухаються від Сонця зі швидкостями 300...1500 км / с (сонячний вітер). Під час сонячних спалахів утворюються також частки високих енергій (в основному протони й електрони), що утворюють сонячну компоненту космічних променів.

Енергетичний внесок корпускулярної складової сонячної радіації в її загальну інтенсивність невеликий в порівнянні з електромагнітною. Тому в ряді програм термін «сонячна радіація» використовують у вузькому сенсі, маючи на увазі тільки її електромагнітну частину.

Кількість сонячної радіації залежить від висоти сонця, пори року, прозорості атмосфери. Для вимірювання сонячної радіації служать актинометри і піргеліометри.

Розрізняють дві групи впливу сонячної радіації: **фотолітичне і фотоокислювальне** (перегрів).

Фотолітичний вплив характеризується виборчим поглинанням сонячних променів в смугах поглинання. Вплив фотонів приводить до відриву фотоелектронів і розриву молекулярних зв'язків. Наслідком цього є зміна кольору ряду полімерних матеріалів, крихкість і втрата міцності, порушення лакофарбових покриттів.

Фотоокислювальний вплив призводить до розриву хімічних зв'язків при одночасному впливі випромінювання, впливу кисню, повітря і вологи. Результатом є посилення корозія (особливо в умовах

тропічного клімату)

Перегрів РЕА до 25...30 К від поглинання енергії сонячних променів відбувається за рахунок: безпосереднього випромінювання Сонця; випромінювання, розсіяного і відбитого атмосферою; теплих шарів повітря, випромінювання від ґрунту, теплопровідності повітря і ґрунту.

Специфічним видом впливів, яким піддається РЕА та її матеріали, є вплив НВЧ випромінювань.

Таким чином, під впливом сонячної радіації:

- змінюється колір полімерних матеріалів;
- захисні покриття втрачають свою міцність і стають крихкими;
- відбувається посилене старіння матеріалів;
- за рахунок поглинання променевої енергії відбувається перегрів радіоапаратури;
- під впливом радіації відбувається відхід параметрів.

Захист від сонячної радіації:

- використання багатошарових корпусів;
- використання навісів і тентів;
- колірні рішення.

У крайніх випадках роблять поглиблення в землю.

9.2 Біологічні фактори

До біологічних факторів відносяться мікроорганізми (цвіль, гриби), комахи, гризуни, тварини і птахи.

9.2.1 Цвіль

Грибкові утворення (цвіль) відносять до нижчих рослин, які не мають фотосинтезу. Вони виділяють лимонну, оцтову, щавлеву кислоти та інші хімічні речовини, під дією яких погіршуються електроізоляційні властивості полімерних матеріалів. Захист від цих утворень обов'язковий для апаратури тропічної зони.

Цвілеві грибки не мають хлорофілу і тому використовують

органічні речовини, на яких відбуватиметься їх зростання. Зростання цвілі відбувається при вологості понад 65% і прискорюється при нерухомості повітря і затемненні. Спори грибів надходять з ґрунту і поширюються повітрям разом з пилом. Вони надзвичайно стійкі до підвищеної температури, сухості, отрут і сонячних променів; навіть при тривалому їх впливі на протязі багатьох років здатні до подальшого зростання.

Найчастіше цвіль розвивається в приміщеннях з підвищеною вологістю і зниженою освітленістю.

Під дією цвілі знижується питомий поверхневий опір діелектриків, утворюються канали витоку зарядів, збільшується корозія металів.

Цвіль руйнує органічні діелектрики, підсилює корозію і, потрапляючи на плату, може викликати коротке замикання. Вражаючи скло, цвіль може викликати зміну його оптичних властивостей.

Ізоляційні матеріали на основі целюлози при впливі цвілевих грибків погіршують свої механічні і електричні параметри і можуть навіть зруйнуватися.

9.2.2 Комахи

Несправності РЕЗ пов'язані також і з комахами, які летять на світло і тепло. Потрапляючи всередину, вони можуть викликати несанкціоноване спрацювання контактів. Їх трупі, особливо при підвищеній вологості, сприяють корозії і утворюють сприятливе середовище для грибової цвілі.

Залишки комах також є живильним середовищем для розвитку мікроорганізмів.

Найбільш небезпечні для РЕА, що працює в тропічних умовах, терміти. Вони поїдають переважно деревину, тому небезпечні для приладів, що мають дерев'яні деталі і пластмаси з деревними наповнювачами і встановлені в дерев'яних будівлях. Терміти також проїдають високомолекулярні штучні сполуки - ізоляцію на основі целюлози, - створюючи небезпеку коротких замикань.

9.2.3 Гризуни

Кабелі в пластмасовій і не армованій гумовій ізоляції можуть пошкоджувати гризуни (щури, миші). Для захисту ізоляції застосовують сталеву оплітку, але зазвичай пошкодження кабелю і проводів гризунами не перевищують 2%, тому доцільніше усунути випадкове пошкодження, ніж застосовувати дорогі захисні заходи.

Слід оберегати апаратуру від неправомірного включення і виключення.

9.2.4 Засоби захисту від біологічних факторів

Захист від цвілі:

- використання матеріалів, які не схильні до утворення на них цвілі (застосування цього методу обмежується можливостями вибору матеріалів);
- зміна внутрішнього клімату в апаратурі, що має на меті позбавити цвілеві грибки сприятливої бази для розвитку (тут головним чином потрібно вживати заходи по зниженню вологості повітря, оскільки саморозігрів як окремих мікросхем, так і повністю всієї апаратури позбавляє грибки сприятливого температури);
- додавання до складу лаку або емалі, якими покривають поверхню деталей, спеціальних хімічних речовин - фунгіцидів;
- створення умов, що перешкоджають утворенню цвілі: протирання виробів, нормальна освітленість, провітрювання приміщення.

Захист від комах:

- застосування фунгіцидів в покривних лаках і емалях та ін. антисептичних речовин;
- застосування тонких металевих сіток в перфорації;
- мінімальне використання органічних матеріалів.

Для захисту від гризунів апаратуру рекомендується встановлювати на високий бетонний фундамент.

ЛІТЕРАТУРА

1 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.

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

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

4 Токарев М. Ф., Талицкий Е. Н., Фролов В. А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры /Под редакцией В. А. Фролова. – М.: Радио и связь, 1984. –224 с.

5 Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.

6 Практическое пособие по учебному конструированию РЭА. / В.Т. Белинский, В.П. Гондюл, А.Б. Грозин и др. под ред. проф. К.Б. Круковского-Синевича. Киев.: Вища школа, 1992 - 389 с.

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

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

9 Ильинский В.С. Защита аппаратов от динамических воздействий. –М.: Энергия, 1984. – 320с.