

ЛІТЕРАТУРА



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

Міністерство освіти та науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра біотехнічних систем

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ БІОМЕДИЧНОЇ АПРАТУРИ

для студентів за напрямом підготовки 6.051402
„Біомедична інженерія“

Тернопіль 2017

Шадріна Г.М., Паляниця Ю.Б. Конспект лекцій з дисципліни «Основи конструювання біомедичної апаратури» для студентів за напрямом підготовки 6.050402 “Біомедична інженерія” // Г.М.Шадріна, Ю.Б. Паляниця – Тернопіль:ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. – 198 с.

Укладачі: к.т.н., доц. Шадріна Г.М., Паляниця Ю.Б.

Рецензент:

Методичні вказівки розглянуто та затверджено на засіданні кафедри біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, протокол № ____ від _____ 2017 р.

Методичні вказівки схвалено та рекомендовано до друку на засіданні методичної ради факультету контрольно-вимірювальних та радіокомп'ютерних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, протокол № ____ від _____ 2017 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Лекція 1. Зміст і завдання дисципліни «Основи конструювання біомедичної апаратури». поняття та визначення.	5
Лекція 2. Характеристика основних стадій конструювання БМА.	12
Лекція 3. Порядок попереднього конструювання основних вузлів приладу.	18
Лекція 4. Основні вимоги до компонування БМА.	25
Лекція 5. Методи забезпечення технологічності конструкції БМА.	33
Лекція 6. Що таке ергономіка і її вплив на конструкцію БМА.	41
Лекція 7. Захист конструкції БМА від динамічних механічних навантажень.	47
Лекція 8. Забезпечення теплових режимів в БМА.	82
Лекція 9. Паразитні процеси в БМА та способи захисту від них. Основні види паразитних зв'язків.	102
Лекція 10. Методи проектування екранів, фільтрів, пошук джерел завад і усунення їх при конструюванні приладу.	111
Лекція 11. Пасивні елементи схеми.	124
Лекція 12. Активні елементи схеми.	137
Лекція 13. Аналогові та цифрові схеми.	142
Лекція 14. Компонування вузлів БМА.	152
Лекція 15. Методи проектування монтажних плат.	159
Лекція 16. Методи конструювання друкованих плат об'ємного і поверхневого монтажу.	169
Лекція 17. Методики виконання заземлення в БМА.	182
Лекція 18. Фактори оточуючого середовища та їх врахування при конструюванні БМА.	193

ВСТУП

Конспект лекцій за змістом відповідає навчальному планові за напрямом базової вищої освіти „Біомедична інженерія” (6.051402). У ньому розглянуто інженерні методи конструювання біомедичної апаратури (БМА), основні вимоги до компоновання БМА та забезпечення технологічності конструкції, основи ергономіки, методи конструювання вузлів і блоків БМА, а також механічні, теплові, електромагнітні явища в БМА.

У результаті вивчення лекційного матеріалу студент повинен знати:

- основні стадії конструювання БМА;
 - методику аналізу вихідних даних для конструювання БМА залежно від призначення, умов експлуатації, умов виробництва;
 - загальні правила компоновання БМА,
 - принципи конструювання БМА різного призначення (аналогових, цифрових, цифро-аналогових);
- вміти:
- розробити технічне завдання (ТЗ) на конструювання БМА;
 - визначити напрям конструювання приладу (вузла) шляхом аналізу: ТЗ, умов експлуатації існуючих виробів-прототипів, умов виробництва;
 - використати засоби автоматичного проектування, пакетів програмного забезпечення для виконання загальної компоновки приладу, його функціональних вузлів, деталей і складових частин БМА;
 - використати засоби обчислювальної техніки для розробки текстової документації на прилад, вміння працювати з базою даних;
 - виконати необхідні розрахунки з використанням прикладних програм на ПЕОМ, які обґрунтовують правильність вибору напрямку конструювання приладу: розрахунок теплових режимів, надійності, механічних характеристик і електромагнітної сумісності, техніко-економічного обґрунтування ;
 - вносити необхідні зміни в комплект конструкторської документації при зміні конструкції приладу.

Лекція №1

Зміст і завдання дисципліни «Основи конструювання біомедичної апаратури». поняття та визначення. Інженерні методи підходу до конструювання біомедичної апаратури, організація процесу конструювання.

Під конструкцією (від лат. construction - складання, побудова) розуміють сукупність деталей і матеріалів (тіл) з різними фізичними властивостями, що знаходяться у визначеному фізичному зв'язку (електромагнітному, тепловому, механічному), що забезпечує виконання заданих функцій з необхідною точністю і надійністю під впливом зовнішніх і внутрішніх впливів і відтворена в умовах виробництва. Конструкція визначає взаємне розташування частин у просторі, способи їх з'єднання, характер взаємодії, а також матеріал, з якого вони виготовлені.

Конструкція біомедичної апаратури (БМА) відрізняється рядом особливостей, що виділяють її в окремий клас серед інших конструкцій:

- ієрархічною структурою (від грець. hierarchia, hieros— священний, arche - влада), під якою розуміють послідовне об'єднання більш простих електронних вузлів у більш складні;
- домінуючою роллю електричних і електромагнітних зв'язків; наявністю неоднорідностей в електричних з'єднаннях, що призводять до спотворення і загасання сигналів, а також паразитних зв'язків, що породжують завади (наведення);
- наявністю теплових зв'язків, що вимагає вживання заходів захисту теплочутливих елементів;
- слабким зв'язком внутрішньої структури конструкції з її зовнішнім оформленням.

1.1 Конструктивні складові біомедичної радіоелектронної апаратури. Основні поняття та визначення

Сучасна радіотехнічна, радіоелектронна та біомедична апаратура відзначається значною складністю, але складається з окремих частин, кожна з яких у конструктивному та функціональному сенсі простіша, ніж увесь пристрій в цілому. Розглянемо окремі частини конструкції складної апаратури [5]. Почнемо з найпростіших елементів – радіодеталей, і завершимо складною системою, яка є комплексом різних приладів та пристроїв.

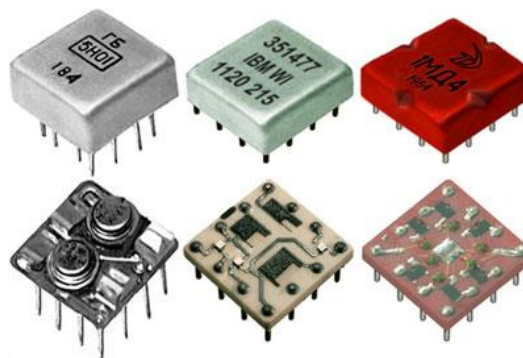
Радіодеталь або елемент – неподільна частина конструкції апаратури. Елементами, наприклад, є конденсатори, резистори, електронні лампи, запобіжники, тверді схеми, напівпровідникові пристрої і т.п.

Модуль – це найпростіша завершена конструкція, яка складається з елементів – радіодеталей. Модулі виконують різні функції, наприклад, підсилення, тригера, логічної схеми і т.п. Модуль, складений з комплексу мікроелементів, називають мікрозбіркою.

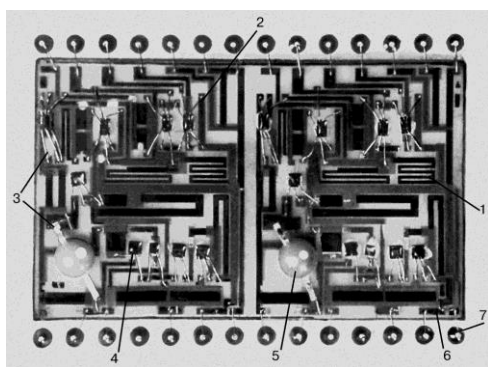
Мікросхеми (плівкові, гібридні, твердотільні) – це модулі малих розмірів виготовлені методами плівкової і напівпровідникової технології. Зовнішнє оформлення деяких модулів, мікромодулів і плівкових мікросхем показано на рисунку 1.1 [5].



а) модуль Bluetooth



б) мікромодулі



в) плівкова мікросхема



г) вузол

Рисунок 1.1. Конструктивне оформлення деяких радіоелементів

Вузол – це завершена конструкція, складена з модулів, елементів, монтажної плати та електричного монтажу (див. рис.1.1, г) [5].

Блок – це завершена конструкція, складена з вузлів, модулів, елементів і електричного монтажу, змонтована на спільному шасі, каркасі, рамі, платі і т.п. (рис. 1.2) [5].



Рисунок 1.2. Блок

Пульт керування – це пристрій оснащений органами керування пристроєм. Пульт керування має форму, зручну для роботи оператора (рис. 1.3)



Рисунок 1.3. Пульт керування

Система (станція) – це комплекс приладів, з'єднаних між собою для розв'язування однієї чи кількох самостійних задач.

При вивченні основ конструювання біомедичних радіоелектронних апаратів будемо користуватися терміном „біомедична апаратура” (БМА), маючи на увазі елемент, вузол, блок, прилад чи апарат, медичного призначення.

Медичний прилад – це технічний прилад, призначений для спостереження, вимірювання, обробки і представлення даних про живий організм з можливістю передачі цих даних .

Медичний апарат – це технічний прилад, який дозволяє генерувати різні енергетичні фактори впливу на живий організм з лікувальною або терапевтичною метою та підтримувати його нормальне функціонування.

Взагалі, поняття “апарат” походить від грецького слова *apparatus* (устаткування, прилад, технічний пристрій). Розділення в медицині цих понять на два (апарат і прилад) пов’язане з енергетичною взаємодією приладу та живого організму (вплив та відбір). Спільний термін для медичних приладів і апаратів є *медична апаратура*.

1.2 Інженерні методи конструювання

Конструкція БМА реалізується відповідно до конструкторської документації в процесі виробництва, основною частиною якого є технологічний процес (ТП), в результаті чого, згідно схеми, виготовляються модулі та блоки, які в подальшому утворюють завершений апарат. Конструкція і технологія виготовлення БМА тісно пов’язані і взаємообумовлені.

Якість конструкції БМА, а також оптимальність самого процесу конструювання (терміни, трудовитрати) залежать не тільки від організації процесу конструювання, але й від методології його проведення. На сьогоднішній день більшість операцій по виготовленню елементів та вузлів автоматизовані, що дозволяє суттєво підвищити якість та скоротити терміни виготовлення.

Конструкція БМА як велика система має наступні ознаки:

- 1) високу складність (складається з великої кількості пристроїв, вузлів і компонентів),
- 2) зв'язок із зовнішнім середовищем (у тому числі з лікарем та пацієнтом),
- 3) ієрархічну структуру.

Складність конструкції БМА обумовлюється тим, що ці засоби широко використовуються при вирішенні складних завдань, що в свою чергу призводить до збільшення функціональних вузлів (модулі зчитування, запису , передачі , архівування даних).

До змінних в процесі конструювання факторів належать, наприклад, марки застосовуваних елементів, форма і розміри елементів конструкції, взаємне розташування компонентів і вузлів, характер елементів підсилення (ребер) і полегшення (вибірок), способи тепловідведення, герметизації, зовнішнє оформлення і т. д.

Обмеженнями є фактори, які конструктор не змінює: ресурсні, системотехнічні, схемотехнічні, конструкторські, технологічні, експлуатаційні.

До **ресурсних** відносять матеріальні, часові, кадрові та енергетичні обмеження.

Системотехнічними обмеженнями є, наприклад, тип БМА: аналогова або цифрова, наземна або бортова, з інформаційним або структурним резервуванням чи без нього, такі, що працюють в режимі разового, багаторазового, безперервного, періодичного використання та ін..

Схемотехнічними обмеженнями, які задаються електричною схемою, є елементна база (швидкодія, струми, завадостійкість, термочутливість, стабільність параметрів і т. д.), число і типи функціональних вузлів, вимоги до їх взаємного розташування і т. д.

Конструкторські обмеження: маса і габарити; рекомендовані типи базових несучих конструкцій, методи реалізації електричних зв'язків; обмежувальні переліки на матеріали, комплектуючі вироби; вимоги до зовнішнього вигляду; патентоспроможність і т. д.

Технологічні обмеження: тип виробництва, вид технологічних процесів, час запуску у виробництво, повторюваність випуску, номенклатура освоєних технологічних процесів та їх стабільність, вимоги по автоматизації і т. д.

Експлуатаційні обмеження: рівень дестабілізуючих факторів - механічних, кліматичних, теплових, радіаційних, електромагнітних впливів; кваліфікація обслуговуючого персоналу, вимоги щодо ремонтпридатності конструкції, час зберігання, час експлуатації (ресурс) і т. д.

1.3 Системний підхід при конструюванні БМА

Методологія пошуку оптимального варіанту конструкції БМА заснована на використанні системного підходу. Суть системного підходу при конструюванні сучасних БМА полягає в тому, що шукають оптимальне (найкраще) рішення при одночасному виконання таких умов як:

- простота виготовлення⁴
- функціональність;
- ремонтпридатність;
- затрати на виготовлення;
- ціна готового апарату.

Застосування сучасної елементної бази – мікросхем, імпульсних блоків живлення, систем бездротового зв'язку дозволяє:

- розширити можливості системи;
- збільшити ефективність, за рахунок переходу від аналогової дротової передачі даних на цифрову;
- знизити вартість і масо-габаритні характеристики при одночасному підвищенні надійності шляхом заміни механічних і електромеханічних компонентів електронними, наприклад заміною реле на потужні малогабаритні транзистори (рис.1.4,а), заміною громіздких і важких трансформаторів на імпульсні перетворювачі (рис.1.4,б).

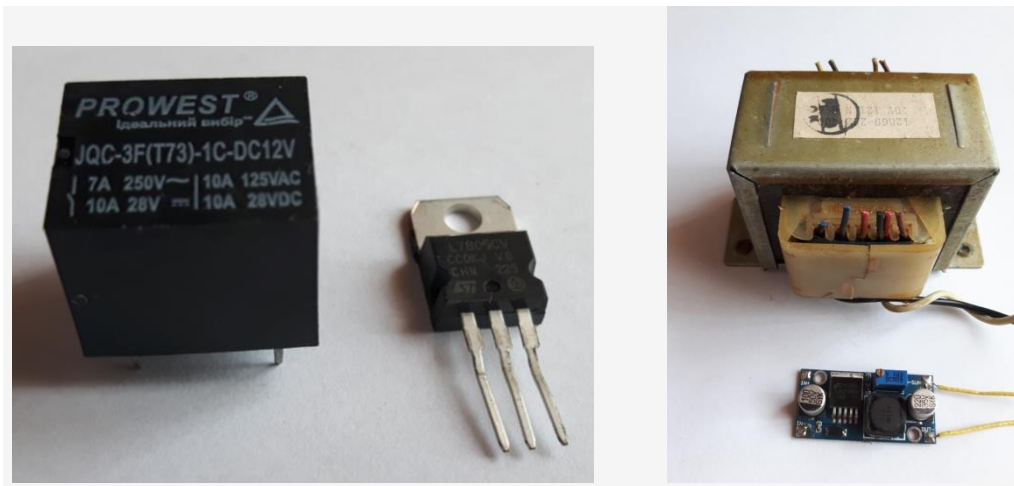


Рисунок 1.4. а) Твердотільне реле та польовий транзистор;
б) Трансформатор та імпульсний перетворювач

Все це дає можливість покращити показники якості БМА, але одночасно вимагає докорінної зміни конструкції. У кінцевому рахунку структура БМА та її конструкція залежать від технологічних можливостей виробництва. Тому системний підхід передбачає врахування при конструюванні не тільки схемотехнічних, але й технологічних факторів. Ефективність використання системного підходу залежить від виду БМА. Найбільш ефективним є системний підхід при конструюванні цифрових пристроїв. Для аналогових пристроїв, у зв'язку із більшою різноманітністю виконуваних функцій, а також ширших діапазонів потужностей та частот сигналів важче використовувати системний підхід. У цілому, використання системного підходу при конструюванні БМА підвищило роль конструктора і технолога, які стали брати участь у створенні БМА з самих ранніх етапів.

1.4 Класифікація БМА

Все різноманіття конструкцій БМА можна класифікувати на лабораторну, діагностичну та терапевтичну.

Ускладнення завдань з обробки сигналів з метою підвищення завадостійкості та рівня насичення інформацією, яку переносять біосигнали, викликало необхідність виділяти в БМА окремі групи пристроїв обробки сигналів: рентгенівські системи, системи радіонуклідної діагностики, магніторезонансні системи, ультразвукові системи, системи візуалізації теплових полів, системи для дослідження електричного імпедансу біологічних тканин, системи для оптичної інтроскопії.

Класифікація БМА за радіотехнічними функціями -- правильна і необхідна, а в інших випадках, з конструкторської точки зору, не є чіткою.

Робоча частота істотно впливає на конструкцію. Класифікація конструкцій за частотним діапазоном відображає особливості конструювання тільки високочастотних каскадів приймальної і передавальної БМА.

Можлива класифікація конструкцій за видом активного елемента, Вид охолодження силових елементів (водяне або повітряне) підпорядковує собі компоновку каскаду.

За впливом навколишнього середовища БМА класифікують як призначену для роботи в приміщенні або в польових умовах.

Всю БМА прийнято ділити на два види: професійну і побутову. Професійною називають апаратуру, яка використовується в наукових лабораторіях, на виробництві, в медичних та інших установах. До побутової відносять апаратуру, придбану населенням для власних потреб (тонометри, електричні термометри, глюкометри).

Найбільш загальною з конструкторської точки зору є класифікація конструкцій БМА за призначенням, тактикою використання та об'єктом установки. Відповідно до цієї класифікації БМА поділяють на 10 груп за трьома категоріями: бортовий, морський, наземної.

Отже, спеціалізація БМА обумовлена тим, що об'єкт установки задає спеціальне функціональне призначення, необхідне тільки для об'єктів даного виду. Альтернативою до спеціалізації в конструюванні є універсалізація.

Універсалізація передбачає розробку конструкцій, придатних для роботи на будь-яких об'єктах і в будь-яких умовах. Універсальна конструкція повинна володіти функціональною надмірністю і відповідати найбільш жорстким умовам з усіх можливих застосувань.

Незалежно від спеціалізації або універсалізації конструкція БМА повинна володіти строго регламентованими властивостями. Економічні показники виробництва (собівартість, рентабельність і інші) враховані в тому обсязі, в якому вони залежать від конструкції, тобто через властивість загальної технологічності збірної конструкції БМА

По суті, конструювання БМА в цілому зводиться до досягнення стійких компромісів між альтернативними вимогами всіх названих вище властивостей.

Лекція №2

Характеристика основних стадій конструювання БМА. Організація процесу конструювання, стадії виконання робіт. Порядок побудови поетапної схеми конструювання вузлів і блоків БМА аналіз вихідних даних, обґрунтування технічних вимог до конструкції БМА.

Під біомедичною радіоелектронною апаратурою (БМА) розуміють виріб біомедичного призначення і його складові частини, в основу функціонування яких покладено засоби радіотехніки та електроніки. БМА, яку необхідно розробляти, повинна відповідати світовому рівню на передбачуваний період її виробництва та експлуатації. Найповніше задовольняти вимоги населення, народного господарства та експорту.

У створенні БМА беруть участь різні організації, підрозділи, виконавці. Організації діляться на замовника, виконавця, субпідрядника. Конструювання є однією з основних частин процесу проектування БМА, а його мета - фізичне втілення компромісного рішення, виробленого в результаті роботи всіх учасників. Замовник формулює технічні вимоги до БМА та здійснює прийняття розробленого виробу.

Стадією розробки називають період, протягом якого здійснюють розробку проектної або робочої конструкторської документації з певним рівнем виконання прийнятих технічних рішень. **Етапом** називають завершену частину стадії розробки протягом якої виконуються окремі роботи з числа встановлених для даної стадії. У багатостадійності такого складного процесу як конструювання закладено глибокий зміст, напрацьований багаторічною інженерною практикою: перехід до детальнішої проробки конструкції можливий лише після виконання попередньої розробки, виконаної в загальних рисах. Це економить трудові затрати і дисциплінує процес обдумування. Кожна стадія завершується підведенням проміжних підсумків, узгодженням та затвердженням результатів з підрозділами, які відповідають у конструкторському колективі за виконання закріплених за ними вимог.

Конструкторське проектування (конструювання) є частиною повного життєвого циклу БМА: побудова, конструювання технологія виготовлення, експлуатація і ремонт, утилізація. Конструкторське проектування в циклі розробка-виробництво розділяється на дві групи стадій: **проектну** (розробка технічної пропозиції та ескізного проекту; розробка технічного проекту) і **робочу** (розробка конструкторської документації дослідного зразка – без присвоєння літери, виготовлення та попереднє випробування дослідного зразка, уточнення технічної документації – з присвоєнням літери О, доопрацювання конструкторської документації з літерою О та приймальні випробування дослідного зразка, уточнення технічної документації – з присвоєнням літери О₁). Проектна група стадій являє собою багатокрокове поступове формування рішення, виходячи із заявки на розробку та технічного

завдання. Робочі стадії присвячені розробці робочої конструкторської документації для виготовлення виробу.

Проектну групу стадій, як правило, виконують під час дослідницько-конструкторської роботи (ДКР) . Робота здійснюється під єдиним технічним і науковим керівництвом у двох взаємопов'язаних напрямках: по електричній схемі та по конструкції. Розробку схем і принципу дії, включаючи макетування і експериментальну перевірку електричних схем здійснюють радіотехнічні підрозділи.

У загальному випадку передбачено три проектні стадії: технічна пропозиція, ескізний проект, технічний проект.

Етапи ДКР: технічне завдання, технічна пропозиція, ескізний проект, технічний проект, розробка робочої документації.

Технічне завдання (ТЗ) складається виконавцем на підставі технічних вимог замовника. На основі загального ТЗ можуть бути складені часткові ТЗ для субпідрядників. Обсяг економічних і виробничих вимог у цих ТЗ менший, а технічні вимоги більш докладні, ніж в основному ТЗ.

Технічна пропозиція - етап розробки, на якому виконавець обґрунтовує принципову можливість створення БМА з заданими в ТЗ характеристиками і намічає основні технічні та організаційні рішення щодо виконання ТЗ. На цьому етапі розробляються часткові ТЗ для різних підрозділів підприємства, оформляється технічний звіт, іноді виконуються конструкторські документи.

Ескізний проект - сукупність конструкторських документів, які містять опрацьовані конструкторсько-технологічні рішення, що дають загальне уявлення про виріб, а також дані, що визначають можливість використання за призначенням і основні параметри розроблюваного виробу. На підставі ескізного проекту розробляється технічний проект.

Технічний проект - це сукупність конструкторських документів, які містять остаточні технічні рішення, що дають повне уявлення про розроблювальний виріб, і технічні дані для розробки робочої документації. На цьому етапі проводяться різні розрахунки і обґрунтування.

Робоча документація - це сукупність конструкторської документації, призначеної для виготовлення та випробування дослідного зразка, настановної серії, серійного зразка. Після заводських випробувань дослідного зразка конструкторської документації присвоюється літера «О»; після державних, міжвідомчих, приймальних і інших видів випробувань - літера «О₁»; на наступних стадіях (після повторних випробувань виготовлених виробів) - літери «О₂», «О₃» і т.д. Конструкторська документація на виріб для установчої серії має літеру «У»; після випробувань установчої серії - літеру «А». Після корегування документації випробувальної серії конструкторської документації присвоюється літера «Б», що дає право налагодити серійне чи масове виробництво виробу. Документації на виріб для разового виготовлення або декількох виробів присвоюють літеру «І».

Залежно від термінів розробки, кваліфікації виконавців, наявності прототипів і базових несучих конструкцій за погодженням із замовником

окремі етапи можуть бути об'єднані. Це відображають в технічному завданні. Конструкторські документи (текстові та графічні) розробляють починаючи з етапу ескізного проекту. На різних етапах є обов'язкові конструкторські документи та документи, які виконують на розсуд розробника. Номенклатура документації, яку виконують на тому чи іншому етапі, називають комплектом. Необхідно відрізнити комплект конструкторської документації від комплекту - вигляду виробу. Найбільшу номенклатуру конструкторських документів має робоча документація на складальну одиницю, але за обсягом найбільше число документів може мати комплекс виробів.

На основі результатів попередніх проектних стадій, згідно з точними правилами оформлення (єдина система конструкторської документації – ЄСКД) виконують комплект креслень та текстових документів, призначених для виготовлення дослідного зразка. Комплект конструкторської документації (КД) підлягає кільком етапам доопрацювання по мірі виготовлення та випробування дослідного зразка.

В ході виконання робіт на стадіях і етапах відбувається поступове уточнення прийнятих рішень і знаходження оптимального. При цьому усуваються помилки, які можуть бути допущені як керівниками (помилки планування тощо), так і виконавцями (неправильний вибір технічних рішень, помилки при виконанні конструкторської документації і т. д.). Причиною помилок є, як правило, недостатня кваліфікація, брак інформації, а також підвищена стомлюваність працівників при стислих термінах розробки. Специфікою розробки БМА є те, що на всіх стадіях і етапах різні фахівці взаємодіють один з одним з самого початку розробки.

Основні етапи проведення НДР: 1) патентний пошук; 2) розробка і узгодження з замовником технічного завдання, державна реєстрація НДР; 3) підготовчий етап - вибір напрямів дослідження, розробка, узгодження та затвердження часткових технічних завдань на основні частини НДР; 4) основний етап - теоретичні та експериментальні дослідження (виконання теоретичних досліджень, розрахунків, математичного моделювання), обробка результатів досліджень, складання та оформлення технічної документації; 5) заключний етап - узагальнення результатів та оцінка виконаної НДР (складання карти технічного рівня, оцінки повноти і якості проведеної НДР, підготовка до пред'явлення роботи до приймання); 6) приймання НДР, обговорення і узгодження завдання на проведення ДКР, державний облік НДР.

Конструктори і технологи, конструкторські та технологічні підрозділи взаємодіють починаючи самих ранніх етапів до впровадження виробу у виробництво та експлуатацію. На перших етапах вирішуються питання конструктивної та технологічної наступності виробів, виявляються оригінальні деталі та вузли, необхідність у розробці нових техпроцесів. На подальших етапах вирішуються питання компонування з урахуванням вимог зручності складання, ремонту, контролю. Одночасно узгоджуються параметри, які підлягають контролю, і допустимі відхилення на ці параметри. У ряді випадків відповідно до технологічних вимог конструкція може корегуватися:

компоновка, значення параметрів, допуски, матеріали. У деяких випадках може знадобитися доопрацювання технологічних процесів - підвищення їх стабільності або роздільної здатності; в ряді випадків може знадобитися розробка або освоєння нових для даного підприємства технологічних процесів (наприклад, при заміні монтажної підстави джерела живлення у вигляді двосторонньої друкованої плати на підставу з металевою основою, поліамідною плівкою або керамікою, що різко покращує тепловідвід і дозволяє скоротити габарити виробу). Взаємодія конструкторів і технологів особливо тісно при узгодженні конструкторської документації з технологіями і при оцінці технологічності конструкції на всіх етапах конструкторського проектування.

Критеріями раціональності конструкції називатимемо ті ознаки (оцінки), за якими можна судити про раціональність створюваного пристрою в ході конструювання. Критерії, що мають схоже формулювання, застосовують для оцінювання раціональності різних конструктивних рішень на окремих етапах роботи конструктора. При цьому вони можуть мати різний конкретний зміст. Так, наприклад, критерій «технологічність конструкцій» на етапі ескізної компоновки всього пристрою в цілому матиме інший конкретний зміст, ніж той же критерій на етапі відробітку конструкції якого-небудь одного вузла. Так само матиме різний конкретний зміст відробіток на технологічність різних деталей, що входять в один пристрій.

Поетапну схему конструювання можна подати у вигляді синтез-аналіз-синтез. Процес пошуку конструкторських ідей та рішень є евристичною працею конструктора, яка важко піддається формалізації.

Творчий характер процесу конструювання перешкоджає конкретизації методики. Чим конкретніша методика, тим обмеженіша сфера її застосування. З іншого боку, загальні методичні ідеї в світлі тих або інших реальних, що стоять перед конструктором, втрачають цінність, оскільки можуть трактуватися по-різному.

Вказане протиріччя стосується і поетапної схеми конструювання. Остання, побудована як типова (для певної області застосування) і не призначена давати конкретні рекомендації для конкретних конструкторських задач.

Початок процесу конструювання – стадії технічної пропозиції, коли формується початковий варіант конструкторського рішення. Часто найперший варіант формується ще раніше при розробці технічних вимог ТЗ, тому що записати вимоги так, щоб їх виконання було реальним можна лише спираючись на мислений образ заданого для розробки об'єкта. На практиці основою такого образу є деякий конкретний прототип, в якому чогось не вистачає або є щось зайве. Конструктор мислить образами и описує їх словесно (вербально), математично (числом або співвідношенням величин) або графічно (рисунком або кресленням).

Конструювання БМА порівняно з конструювання інших промислових виробів відрізняється особливою складністю функціональних внутрішніх

зв'язків між частинами конструкції: крім просторових і механічних, необхідно встановлювати складні електричні зв'язки та обмежувати електромагнітні поля, температуру і температурний градієнт на заданих ділянках всередині пристрою.

Оцінка значимості зв'язків, які розглядаються в певному контексті (необхідні, зайві, шкідливі), повністю залежить від конкретної задачі.

Сфера застосування поетапної схеми визначається рядом обмежень, прийнятих при її побудові. Тут у вигляді підсумку беруть до уваги як вже введені раніше обмеження, так і наново запроваджені. Всі обмеження можна розділити на дві групи: обмеження, що стосуються пристрою, який конструюється і обмеження, що стосуються процесу конструювання.

Обмеження першої групи. Пристрій, критичний до габаритів і ваги. Він є відособленою конструкцією, призначеною для виконання цілком визначених функцій. Проте, він не є комплексною системою, яка складається з окремих просторово розділених частин, не зв'язаних кінематично. Пристрій розробляється як дослідний зразок.

Обмеження другої групи. Поетапна схема орієнтована виключно на розкриття особливостей процесу власне конструювання, включаючи і підготовку до нього.

Вказані обмеження можуть бути конкретизовані таким чином.

Не розглядається процес розробки принципової схеми пристрою. Передбачається, що конструктор отримує схему готовою в технічному завданні, але в ході роботи може якоюсь мірою видозмінювати і уточнювати її. Кінематика пристрою розробляється конструктором, але в рамках принципової схеми.

Етапи деталювання, перевірки, оформлення робочих креслень не розглядають. Процес конструювання в рамках прийнятої схеми закінчується кресленням детального складального вигляду, придатного для деталювання.

Питання розробки креслень для серійного виробництва не розглядають. Така розробка у більшості випадків проводиться після випробувань дослідних зразків на основі результатів цих випробувань. Методика розробки креслень для серійного виробництва є предметом окремого дослідження.

Ніде не згадується про те коректування, яке безперервно ведеться при конструюванні навіть перших дослідних зразків на основі інформації про аналогічні пристрої, створені раніше, інформації про різного роду випробування цих пристроїв і т. п. та про роль і методи отримання інформації, яка необхідна конструктору на всіх охоплених схемою етапах роботи.

Узагальнюючи попередній матеріал, поетапну схему процесу конструювання деякого пристрою можна розділити на три частини.

Верхня частина схеми ілюструє процес оцінки раціональності створюваної конструкції з метою досягнення до якнайповнішої відповідності між створюваною конструкцією і заданими вимогами.

Середня частина схеми відображає переробку вихідного матеріалу в форму технічних вимог і далі у процес послідовної реалізації вимог в конструкції в ході власне конструювання. При реалізації вимоги і параметри завдання по черзі «матеріалізуються» в конструкцію. Цей процес продовжується і при деталюванні.

Реалізація вихідного матеріалу в конструкції є поняттям, що відображає зовні приховану розумову роботу по створенню пристрою.

Середню частину схеми можна розділити на дві області. Утворені області символізують роботу конструктора над технічними вимогами (над їх початковим складанням і подальшими змінами) та роботи, супутні конструюванню: розрахунки, експерименти, макетування та ін.

Нижня частина схеми ілюструє процес оцінки раціональності створюваної конструкції по наступних критеріях:

- надійність конструкції;
- мінімізація ваги;
- мінімізація габаритів;
- технологічність конструкції;
- економічність конструкції.

Не лише порівняльна важливість, але також число і найменування критеріїв даної групи можуть варіюватися залежно від специфіки кожного конкретного пристрою. Ці критерії нижньої частини схеми характеризуються значною універсальністю, причому кожен з вказаних п'яти критеріїв даної групи є комплексним

Кожен з попередніх етапів не може вважатися повністю завершеним у момент переходу до подальшого етапу. Сказане слід розуміти в тому сенсі, що результати кожного етапу вимагають коректування і уточнення на наступних етапах. Творчий процес конструювання зводиться значною мірою до визначення послідовності етапів і вибору критеріїв раціональності конструкції на кожному етапі. Обидва ці процесу також носять творчий, евристичний характер і навіть у рамках конкретних задач нелегко піддаються аналізу. Зокрема, вибір критеріїв раціональності конструкції залежить від безлічі взаємозв'язаних змінних і передусім від даних технічного завдання.

Список використаної літератури

- Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных схем. – М.: Высш. шк., 1990. – 432с.
- Гелль П. П. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. – Л.: Энергия, 1972. – 232с.

Лекція №3

Порядок попереднього конструювання основних вузлів приладу. Вивчення та аналіз технічного завдання і вихідних даних на конструювання, вивчення взаємозв'язків конструкції БМА із зовнішніми пристроями та техніко-економічних можливостей. Обґрунтування технічних вимог до конструкції БМА.

Вимоги, які висувають до конструкції БМА визначаються її призначенням, областю застосування, умовами експлуатації, типом виробництва. Вимоги зводять в технічне завдання (ТЗ) на розробку, яке складають на основі вимог нормативно-технічної документації (НТД – держаних, республіканських, галузевих стандартів, стандартів підприємств, технічних вимог, керуючі технічні документи), вимоги замовника, вивчення потреб зовнішнього і внутрішнього ринку, аналізу кращих вітчизняних та зорубіжних аналогів, наукового прогнозування. ТЗ є вихідним документом для розробки БМА. Та технічної документації на неї. Відповідно до стандарту, ТЗ включає в себе такі розділи:

- «Найменування та область застосування» ,
- «Підстава для розробки та її джерела»,
- «Мета та призначення розробки»,
- «Технічні вимоги»,
- «Економічні показники»,
- «Етапи розробки»,
- «Порядок контролю і прийомки, додатки».

У розділі «Найменування та область застосування» вказують найменування виробу, і дають коротку характеристику області його застосування. У розділі «Підстава для розробки та її джерела» вказують найменування документу, на підставі якого проводять розробку та організації, яка затвердила цей документ (у випадку курсового або дипломного проектування – завдання на проектування, видане кафедрою) Слід відмітити, що ТЗ на конструкторську розробку, повинно містити схему електричну принципову виробу Тут же наводять НТД та інші джерела (каталоги продукції, яку випускає промисловість, технічні умови, інструкції по експлуатації аналогів, технічну літературу), які використовуються при складанні ТЗ. Розділ «Технічні вимоги» містить вимоги до виробу.

Розробка технічних вимог передуює розробці ТЗ. Технічні вимоги (ТВ) на розробку БМА визначають показники призначення (потужність, чутливість, роздільну здатність і т. д.), а також містять вимоги до конструкції: найменування, кількість і призначення основних частин; габаритні, установочні і приєднувальні розміри; вимоги щодо взаємозамінності частин, уніфікації, типізації, стандартизації та наступності. Крім того, у ТВ входять вимоги з охорони навколишнього середовища, завадо-захисності, складу

запасного майна, безпеки праці, ергономіки та естетики, умов експлуатації (виду об'єкта установки, рівням кліматичних, механічних, радіаційних та біологічних впливів, порядку обслуговування, кваліфікації обслуговуючого персоналу і т. д.).

Виконавець на підставі ТВ розробляє технічне завдання ТЗ, в якому містяться економічні, виробничі та інші вимоги, визначається порядок розробки і приймання виробу. Субпідрядник вирішує для виконавця приватні питання: розробку і поставку нових матеріалів, елементів, вузлів, технологічних процесів, методів вимірювань або проводить випробування, відпрацювання на відповідність вимогам ергономіки і т. д.

Початковий етап конструкторської розробки - конструкторський аналіз вихідних даних, під час якого необхідно конкретизувати і сформулювати на основі виробленого аналізу додаткові вимоги до конструкції, потім виділити з електричної схеми радіоелектронні функціональні вузли, які повинні бути реалізовані у вигляді модулів нижчих рівнів - радіоелектронних комірок.

Конструкторський аналіз вихідних даних складається з наступних етапів:

- 1) аналіз вимог ТЗ;
- 2) з'ясування принципу роботи блоку, виконання аналізу схеми електричної принципової;
- 3) аналіз елементної бази;
- 4) аналіз конструкцій аналогічного призначення.

Аналіз вимог ТЗ необхідний для з'ясування конструктивних особливостей майбутнього виробу, які впливають з умов його експлуатації, обсягу виробництва та інших факторів.

При аналізі ТЗ необхідно встановити:

- 1) призначення блоку;
- 2) місце установки та умови експлуатації;
- 3) способи зчленування розроблювального блоку з об'єктом установки;
- 4) вимоги, що пред'являються до габаритів, форми, маси блоку;
- 5) вимоги, що пред'являються до захисту від кліматичних впливів;
- 6) методи захисту від механічних впливів;
- 7) вимоги, пропоновані до забезпечення технологічності конструкції розроблюваного пристрою;
- 8) вимоги до надійності;
- 9) вимоги до забезпечення ремонтпридатності;
- 10) вимоги ергономіки і технічної естетики;
- 11) вимоги техніки безпеки;
- 12) економічні вимоги;
- 13) інші вимоги, що враховують особливості і специфіку розроблювального БМА.

Аналіз схеми електричної принципової доцільно проводити на рівні функціональної схеми. Для початку необхідно провести аналіз елементної бази. Завдання аналізу елементної бази полягає в тому, щоб встановити, чи відповідає вона заданим умовам експлуатації чи ні і, в разі невідповідності,

застосувати конструктивні методи забезпечення її працездатності для заданих умов. З цією метою необхідно зіставити її експлуатаційні характеристики з тими даними, які характеризують умови роботи розроблюваного виробу по ТЗ.

Елементна база зазвичай задана конструктору і міститься в переліку елементів схеми електричних з'єднань (ЕЗ) БМА. Елементна база включає: дискретні елементи, моточні вироби (трансформатори, лінії затримки, дроселі, котушки індуктивності), напівпровідникові прилади, інтегральні схеми, вироби електроприводу і автоматики, комутаційні вироби, мікропроцесорні комплекти, контрольно-вимірювальні прилади, волоконно-оптичні кабелі зі з'єднувачами і т. д.

При аналізі доцільно встановити також схемну надійність елементної бази з урахуванням потоку раптових відмов. Експлуатаційні характеристики елементів наведені в паспортах на них.

За інтенсивністю відмов вираховується середнє напрацювання на відмову у відповідності з виразом

$$T_c = \frac{1}{\sum \lambda_i n_i K_{Hi}},$$

де T_c – напрацювання, год;

λ_i – інтенсивність відмов, 1/год;

n_i – кількість елементів даного типу;

K_{Hi} – коефіцієнт навантажень для заданих умов експлуатації.

Якщо елементна база обрана вірно, то величина повинна бути приблизно на порядок вища, ніж середній час напрацювання на відмову, заданий по ТЗ, оскільки оцінка носить наближений характер через неврахування реального режиму роботи конструйованого блоку.

Проведення аналізу конструкцій аналогічного призначення передбачає огляд конструкторських аналогів, під якими слід розуміти вироби, що мають те ж функціональне призначення, що і конструйований блок. За аналоги можуть бути взяті конструкції окремих вузлів - модулів.

За своїми характеристиками вироби, обрані за аналоги, повинні відповідати кращим вітчизняним або зарубіжним зразкам продукції випуску не раніше трирічної давності. Якість розроблювальної конструкції виробу на наступних етапах конструювання оцінюватиметься шляхом зіставлення його параметрів з відповідними показниками аналогів, зокрема, з даними одного з аналогів, прийнятого за базову конструкцію.

Відповідно до цього, вивчаючи аналоги, треба визначити їх показники призначення, у тому числі компоновальні характеристики, показники надійності, а також показники технологічності.

Вивчення конструкторських аналогів необхідно також для забезпечення конструктивної наступності, під якою розуміють виявлення прогресивних технічних рішень і використання їх у розроблюваній конструкції. Крім цього, ознайомлення з конструкціями аналогів сприяє створенню зримого образу майбутньої конструкції БМА.

Слід врахувати, що, виконуючи аналіз конструктивних аналогів, необхідно вивчати і описувати конструктивні рішення, а не схеми ЕЗ аналогічних пристроїв. У тексті повинні бути приведені ескізи (фото, малюнки) досліджуваних аналогів. За результатами виконаного аналізу повинні бути сформульовані конкретні рекомендації щодо застосування типових конструктивних і технологічних рішень у розроблюваному виробі.

При отриманні технічного завдання на конструювання нового пристрою конструктор перш за все шукає у завданні якомога повне і строге формулювання тієї кінцевої мети, яка перед ним ставиться.

Якщо конструктор підключається до роботи колективу над складним проектом для вирішення приватного завдання, притому підключається не з початкового, а з проміжного етапу, то це обмежує його обізнаність у відношенні проекту в цілому. Отже, йому нелегко встановити правильність постановки мети в завданні.

Якщо створюваний пристрій є частиною більш загальної технічної системи, то кінцева мета, яка ставиться перед конструктором в завданні, повинна бути сформульована на основі знання місця і ролі пристрою в системі. В цьому випадку цільове призначення пристрою визначається цільовим призначенням системи, що може зменшити завжди існуючу небезпеку підміни кінцевої мети.

Першочергове завдання конструктора – переконатися в тому, що кінцева мета сформульована правильно, що не відбулося її підміни яким-небудь приватним конкретизованим рішенням. Розробник технічного завдання може або помилково ототожнювати таке рішення кінцевою метою, або необґрунтовано рахувати його найкращим. У обох випадках воно може декларуватися в завданні, як обов'язкове. Нерідко з факту такої підміни витікає і помилковий вибір проміжних цілей. Необхідність критичного підходу до формулювання мети є однією з особливостей інженерних, в частковості конструкторських завдань, на відміну від строго поставлених учбових завдань математичного характеру з однозначно заданими умовами. Початківець конструктор повинен розуміти цю особливість, бути готовим до неї.

Спочатку необхідно усвідомити загальний принцип роботи блоку. З цією метою аналіз доцільно проводити на рівні функціональної схеми.

Слід пам'ятати про одне з основних завдань аналізу схеми, яке полягає в тому, щоб вже на даній стадії з'ясувати, які з функціональних вузлів схеми будуть у подальшому об'єднані в модулі, що реалізуються на друкованих платах (модулі першого рівня).

При аналізі електричної схеми необхідно:

- 1) встановити характер зв'язків між елементами схеми з метою подальшої їх реалізації;
- 2) з'ясувати робочі частоти радіоелектронних функціональних вузлів;
- 3) визначити величини споживаної і розсіюваною потужності в блоці;

4) визначити каскади, елементи і ланцюги, чутливі до завад, а також власні джерела завад, зробити висновки про необхідність застосування екранів та екранування проводів;

5) усвідомити, які є органи управління, індикації та контролю роботи блоку і де вони повинні бути розташовані;

6) визначити найбільш теплонавантажені елементи;

7) визначити найбільш важкі елементи і елементи, що вимагають спеціального кріплення;

8) виділити ланцюга, що знаходяться під високою напругою відносно корпусу блоку, зробити висновок про необхідність вжиття заходів для захисту лікаря та пацієнта;

9) визначити, якими елементами зовнішнього зв'язку блок з'єднується з іншими пристроями: через гніздо, з'єднувач, коаксіальний з'єднувач і т. д.;

10) усвідомити можливість застосування мікрозборок;

11) встановити можливість використання уніфікованих і стандартних вузлів.

За аналоги можуть бути взяті конструкції окремих вузлів - модулів.

При аналізі конструкцій аналогічного призначення доцільно висвітлити такі питання:

1) сумісність з об'єктом установки; тут необхідно з'ясувати, якими методами здійснюються встановлення та кріплення БМА на об'єкті, встановити, як здійснюється зв'язок ланцюгами живлення і сигнальним ланцюгах з іншими пристроями;

2) які органи управління індикації і регулювання виведені на лицьову панель; які з них винесені на інші панелі; які особливості установки і кріплення перерахованих органів?

3) чи забезпечує зовнішнє компонування зручність роботи оператора?

4) які методи і засоби композиційного рішення обрані для досягнення художнього сприйняття БМА?

5) які особливості несучої конструкції з точки зору зручності і швидкості доступу до внутрішніх вузлів БМА, тобто методи забезпечення ремонтпридатності?

6) які конструкційні матеріали використані в несучій конструкції корпусу, які способи виготовлення (наприклад, алюмінієвий сплав АЛ9, лиття під тиском з наступною механічною обробкою і т.д.)?

7) чи застосовуються герметизація або ущільнення в корпусі; якими конструктивними методами забезпечується герметичність корпусу; якщо корпус не герметичний, встановити, чи є вентиляційні отвори; яка їхня форма, спосіб виготовлення?

8) якими методами забезпечується захист матеріалу корпусу від корозії?

9) які особливості компоновки РЕЗ (касетна, книжкова або розміщення окремих осередків з об'ємним і друкованим монтажем на загальному шасі і т.д.)?

10) як виконана несуча конструкція, з яких матеріалів виготовлені її елементи і як вони з'єднуються?

- 11) яким способом з'єднані шасі з передньої і задньої панелями?
- 12) яким способом кріпляться функціональні вузли на несучих?
- 13) які клітинки виконані на друкованих платах; які виконані за допомогою навісного монтажу?
- 14) чи є в РЕЗ важкі елементи, де вони розміщені, як кріпляться?
- 15) чи є високовольтні вузли і ланцюги; як кріпляться елементи, що знаходяться під високим потенціалом, на несучих?
- 16) яким способом кріпляться високовольтні дроти на контактних елементах?
- 17) які заходи захисту оператора та елементів апаратури від високої напруги?
- 18) чи застосовується екранування функціональних вузлів; яких саме; з якого матеріалу виконаний екран?

При розробці додаткових вимог до конструкції блоку. слід враховувати нові методи конструювання, сучасні досягнення в технології виробництва БМА, діючі стандарти. Вимоги до конструкції доцільно систематизувати за групами

1) експлуатаційні: габарити, форма, маса, якість виконання БМА основних функцій; умови обслуговування і ремонтпридатності, конструктивне оформлення, надійність;

2) конструктивно-технологічні: захист від зовнішніх механічних навантажень; захист від вологи, пилу і мікроорганізмів, захист від агресивного середовища, захист від електромагнітних полів і іонізуючої радіації, забезпечення наступності та технологічності конструкції, уніфікації л стандартизації;

3) технічної естетики та ергономіки: принцип розміщення органів управління, контролю та індикації на лицьовій і інших панелях блоку; засоби і методи композиції для забезпечення художньої виразності виробу, в тому числі колірної гами;

4) економічні: витрати на розробку і виробництво, витрати матеріалів, витрати часу;

5) інші вимоги, що враховують особливості конструйованого виробу.

Важливою роботою конструктора є виділення структурних одиниць (модулів) нижчих рівнів і визначення їх габаритів. Під структурними одиницями нижчих рівнів розуміють радіоелектронні вузли або модулі (перший рівень). Комірка - це складальна одиниця, яка містить друковану плату з встановленими на ній радіoeлементами (РЕ), які з'єднані електрично і механічно закріплені. Слід звернути увагу на те, що згідно з нормативними документами до модулів нульового рівня відносяться неподільні елементи, призначені для реалізації функцій перетворення сигналів або інформації. Зазвичай це елементи (РЕ, інтегральні схеми (ІС), елементи функціональної мікроелектроніки), які не мають самостійного експлуатаційного застосування.

При установці модуля першого рівня в несучу конструкцію, габаритні розміри якої стандартизовані, утворюється базова несуча конструкція (БНК)

першого рівня. Зазвичай це вставною каркас або касета, що містить багатовиводних з'єднувач зовнішньої стикування і ключ.

Другий структурний рівень - рама або блок, - містить модулі першого рівня. Модуль другого рівня може комплектуватися осередками. Базова несуча конструкція другого рівня - стандартна рама або корпус блоку. Третій структурний рівень конструкції являє собою приладову стійку, шафа, пульт, тумбу, стелаж, стіл, приладовий блок. Базова несуча конструкція третього рівня - каркаси, корпуси стійок, шаф, пультів, кожухи.

При виділенні структурних одиниць нижчих рівнів - осередків - і комплектуванні їх ЕРЕ використовують наступні принципи (критерії) [1, с. 15]: функціональної закінченості; електромагнітної сумісності; теплової сумісності; механічної сумісності; технологічності.

Критерій функціональної закінченості означає, що до складу РЕЗ першого рівня повинні входити один або кілька функціональних вузлів або пристроїв, яким надається конструктивна відособленість у вигляді осередку, модуля, касети. Застосування критерію електромагнітної сумісності означає, що до складу даного РЕЗ першого рівня повинні входити такі ЕРЕ в повинно бути забезпечене таке їх розміщення, щоб при роботі в режимі, передбаченому схемою, не відбувалося б зміна їх вихідних параметрів понад встановлені межі внаслідок взаємних паразитних зв'язків і наводок і, як наслідок, зміна вихідних параметрів всього РЕЗ першого рівня за допустимі межі.

Якщо в складі передбачуваного модуля є елементи, які можуть бути джерелами завад для інших елементів даного модуля, необхідно передбачити їх екранування. Застосування критерію теплової сумісності означає, що до складу даного РЕЗ першого рівня повинні включатися такі ЕРЕ і повинно бути забезпечене таке їх розміщення, щоб при функціонуванні в передбаченому режимі не відбувалося б зміни вихідних параметрів кожного з них за встановлені допуски внаслідок програвів і, як наслідок, зміна вихідних параметрів всього РЕЗ першого рівня за допустимі межі. Дотримання принципу механічної сумісності означає, що до складу даного РЕЗ першого рівня недоцільно включати одночасно дуже важкі й дуже легкі, чутливі до механічних впливів елементи. Кінематичні вузли і пов'язані з ними ЕРЕ доцільно виділяти в самостійні осередки.

Дотримання критерію технологічності необхідно для забезпечення зручності розміщення елементів і виконання зв'язків між ними, зручність наладки і можливості контролю в процесі виробництва та експлуатації, легкості доступу до елементів, що вимагає заміни, а при необхідності і заміни всього РЕЗ першого рівня, можливості застосування автоматизованих засобів установки елементів і складання вузла. До самостійних вузлів нижчих рівнів слід відвести лицьову панель, на якій розміщуються органи управління, настройки та індикації, а також задню панель з встановленими на ній елементами і вузлами зовнішньої стикування.

Лекція №4

Основні вимоги до компоновання БМА. Розробка попередніх варіантів ескізного компоновання приладу, особливості графічного відображення компоновання, аналіз технічних вимог.

4.1 Основні вимоги до компоновання БМА

Етап конструювання – компоновання складного пристрою в найменшій мірі піддається логічному аналізу. Усі можливі комбінації розташування вузлів та деталей проектується в САПР, де можна оцінити всі переваги компоновки, перевірити електро-магнітні впливи. Можна, однак, сформулювати декілька істотних для починаючого конструктора рекомендацій. Перш за все, що комбінації, які народжуються в голові конструктора, несуть на собі область його знань, спостережень, повсякденного і професійного досвіду. Тому в першу чергу виникають варіанти, пов'язані із найприйнятнішими, частіше конструктивними існуючими на даний момент рішеннями. Хід думок і дій конструктора при порівнянні і виборі варіантів може бути приблизно таким:

«Цей вузол достатньо поширений, випробуваний і надійний. Вельми і вельми спокусливо застосувати його цілком, нічого не міняючи. Виготовлення пристрою відразу різко здешевиться... Подивимося, проте, як виник цей вузол ..., які функції він виконує в існуючих пристроях і які виконуватиме в тому, який створюється? Які вимоги пред'являлися до нього раніше? Які пред'являються тепер? Випишемо колишні і майбутні вимоги у вигляді двох списків. Порівняємо ці списки. Чи все тут виявлено? Чи немає чого-небудь завуальованого? Чи є в другому списку вимоги, яких немає в першому? Чи істотні ці нові вимоги? Як їх задовольнити? Чи є в першому списку вимоги, яких немає в другому? Як вплинула на конструкцію вузла наявність саме цих вимог? Чи став він важчим? Чи став він більшим по габаритах? Чи багато ми програємо по вазі, пристосувавши цей вузол для наших цілей? Чи не ускладниться схема компоновки із-за включення в неї вузла із заданою конфігурацією? Чи не вигідніше деякі функції вузла покласти на інші частини пристрою, а сам вузол, сильно спростивши його, все-таки зробити заново?»

4.2 Попереднє ескізне компоновання БМА

Ескізний проект - це вид конструкторської документації на виріб, який містить принципові конструктивні рішення і дає загальне уявлення про будову та принцип дії пристрою та дані, що визначають відповідність його призначенню.

Вибраний варіант підлягає детальній проробці для виявлення можливості найповнішого задоволення всіх поставлених вимог. На цій стадії розробляють всі електричні схеми з розбивкою на блоки та вузли, виготовляють окремі макети для відпрацювання електричних схем, в тому числі для визначення

температурних режимів. Після узгодження та затвердження на технічній раді, ескізний проект є основою для наступної завершальної проектної стадії – технічного проекту, або, якщо це передбачене в ТЗ і не змінене в ході ескізного проектування, стає основою для робочого проектування.

Поєднання вибраних варіантів яких-небудь двох частин, узяті за основу, витримує перше випробування, якщо вдається на цій основі вдало підігнати один до одного решту всіх частин пристрою. Надалі остаточний варіант компоновки перевіряється більш повно, зокрема, на задоволення ряду вимог, що залишилися.

Необхідність розміщення ряду елементів саме в цій області диктується геометричним і фізичним сенсом. Труднощі розміщення всіх цих вузлів в межах критичної області стають першочерговими і концентрують на собі увагу конструктора.

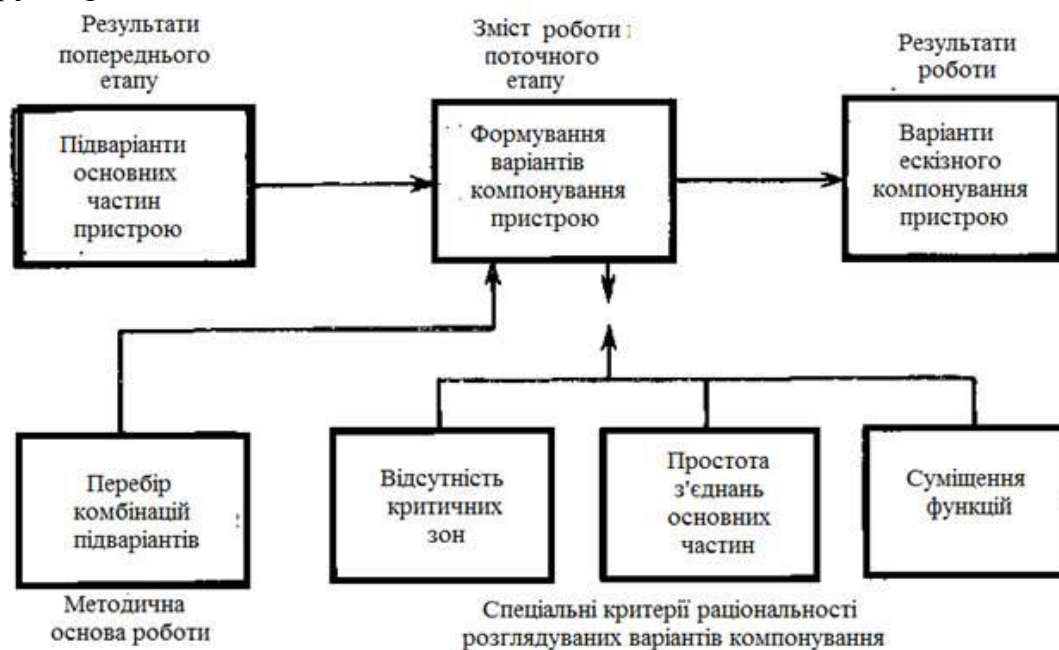


Рисунок 4.1. Етап компоновання

На схемі рис. 4.1 як передумови успішного виконання даної стадії компоновання фігурують такі чинники, як «відсутність критичних зон», «простота з'єднань основних частин» і «поєднання функцій». Під простотою з'єднань можна розуміти нечисленність сполучних деталей, їх технологічну простоту і малу вагу, а також забезпечення простоти збірки і розбирання основних частин, а також і інші чинники. У кожній конкретній конструкції той або інший чинник отримує більшу або меншу значущість.

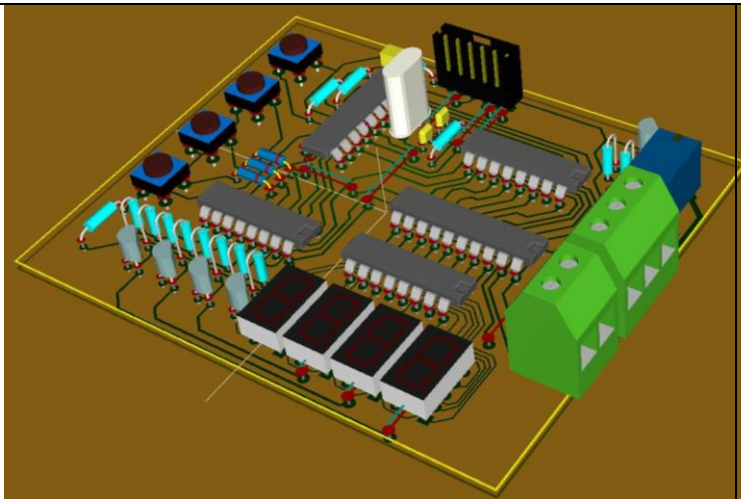
Стосовно поєднання функцій, то при опрацюванні варіантів компоновання і переході від одних варіантів до інших, не слід забувати про прийнятий спочатку розподіл функцій між основними частинами.

Логічна послідовність компоновання, при якій конструктор спочатку розчленовує принципову схему на частини, а потім все-таки знаходить можливості до їх інтеграції, може вважатися характерною для випадків

глибокого конструкторського опрацювання складних пристроїв. Для простих пристроїв з невеликим числом деталей попереднє розчленовування на відособлені частини в ході компонування не завжди доцільне.

4.3. Визначення габаритних розмірів і маси конструктивних вузлів методами 3D моделювання

Сьогодні робота конструктора суттєво полегшилась, оскільки не потрібно проводити складних розрахунків і створювати моделі вручну для цього на озброєні сучасного конструктора є такі програми як Компас, Solid Work , та інші. Які дозволяють не лише оцінити загальну компоновку майбутнього приладу а й оцінити фізичні навантаження на вузли, електромагнітну сумісність, сумісність по теплових режимах, охолодження зібраного пристрою.



Риснок 4.2. Проектування монтажної плати

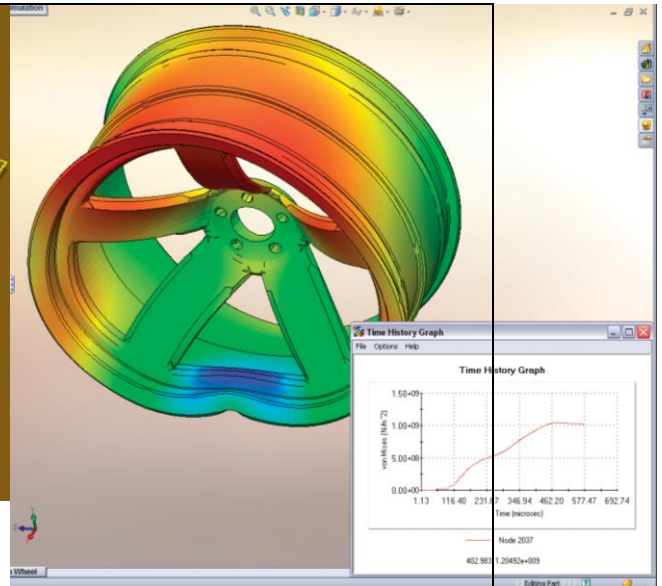


Рисунок 4.3. Перевірка фізичних навантажень на конструкцію

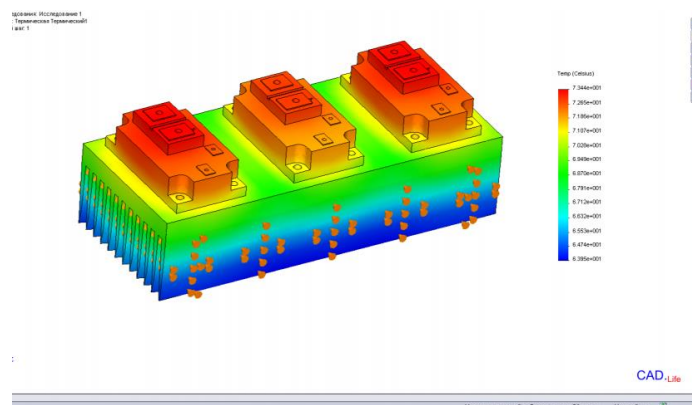


Рисунок 4.4 Ілюстрація термопроцесів

4.4 Вибір форми блоку

Найбільш істотними факторами, що впливають на вибір форми блоку, є:

- 1) місце установки та зручність з'єднання з об'єктом установки;
- 2) вимоги лаконічності форми для максимального застосування уніфікованих і стандартизованих виробів, що характеризуються, у свою чергу, простими і чіткими обрисами поверхонь і ліній сполучення. З цієї причини більшість вимірювальних блоків, а також блоки, що вбудовуються в стійки, виконують у формі паралелепіпеда;
- 3) характер та інтенсивність механічних навантажень, що діють на БМА в процесі експлуатації.;
- 4) склад і форма конструктивних вузлів, з яких компонується БМА;
- 5) вимоги ергономіки;
- 6) традиційність форми БМА аналогічного призначення.

4.5. Внутрішнє компонування блоку

Внутрішнє компонування блоку можна виконувати методами графічної компонування, застосовувати САПР, використовувати окремі програмні модулі, розраховані на виконання компонування із застосуванням ЕОМ.

При використанні методу графічного компонування рекомендується дотримуватися наступних правил, що випливають із необхідності забезпечення електромагнітної, теплової, механічної сумісності, ремонтпридатності і технологічності:

1) намітити "вхід" і "вихід" блоку, відповідні вхідним і вихідним сигналам; при цьому "вхід" і "вихід" необхідно рознести на максимально можливу відстань;

2) розміщення конструктивних комірок у блоці повинно бути таким, щоб шлях основного сигналу при проходженні від комірки до комірки якнайближче мав форму, що з'єднує "вхід" і "вихід" блоку. Розміщати комірки в блоці слід згідно з принципом максимальної зв'язності, що означає компактне розміщення найбільш зв'язаних електричних вузлів. Так, наприклад, поряд з "входом" розташувати модуль, найбільш пов'язаний з ним; потім розмістити вузол, максимально пов'язаний з попереднім, і т.д. до "виходу" блоку. Ідеальний випадок розташування конструктивних осередків - розташування їх "в лінійку", коли комірки розміщуються строго по прямій лінії від "входу" до "виходу";

3) теплонавантажені комірки доцільно розміщувати якомога ближче до країв плати, на якій виконується компонування;

4) важкі конструктивні вузли, а також вузли, що вимагають спеціального кріплення, слід розташовувати ближче до зовнішнього периметру плати-основи;

5) конструктивні вузли, органи управління яких повинні знаходитися на лицьовій панелі, потрібно розміщувати якнайближче до місця їх встановлення;

6) виходячи з необхідності забезпечення електромагнітної і теплової сумісності, відстані між ймовірними "джерелами завад" і "приймачами завад", так само, як і відстані між теплонавантаженими і термочутливими вузлами, необхідно вибирати якомога більшими;

7) орієнтація комплектуючих вузлів повинна забезпечувати найкращі умови теплообміну;

8) центр ваги блоку потрібно, по можливості, розташовувати ближче до геометричного центру блоку (або до осі, що проходить через центр);

9) орієнтацію конструктивних вузлів необхідно вибирати з урахуванням можливих напрямів дії динамічних навантажень таким чином, щоб забезпечити мінімальні деформації і напруження в елементах конструкції та електро-радіоелементах при дії зазначених навантажень;

10) при виконанні компоновання слід передбачити місце на платі для розміщення елементів для забезпечення теплового режиму, віброізоляції, герметизації, електромонтажу, кріплення; :

11) при компонованні конструктивних вузлів необхідно забезпечити доступ до тих вузлів, які вимагають частой заміни або огляду. Це стосується, в першу чергу, кінематичних вузлів;

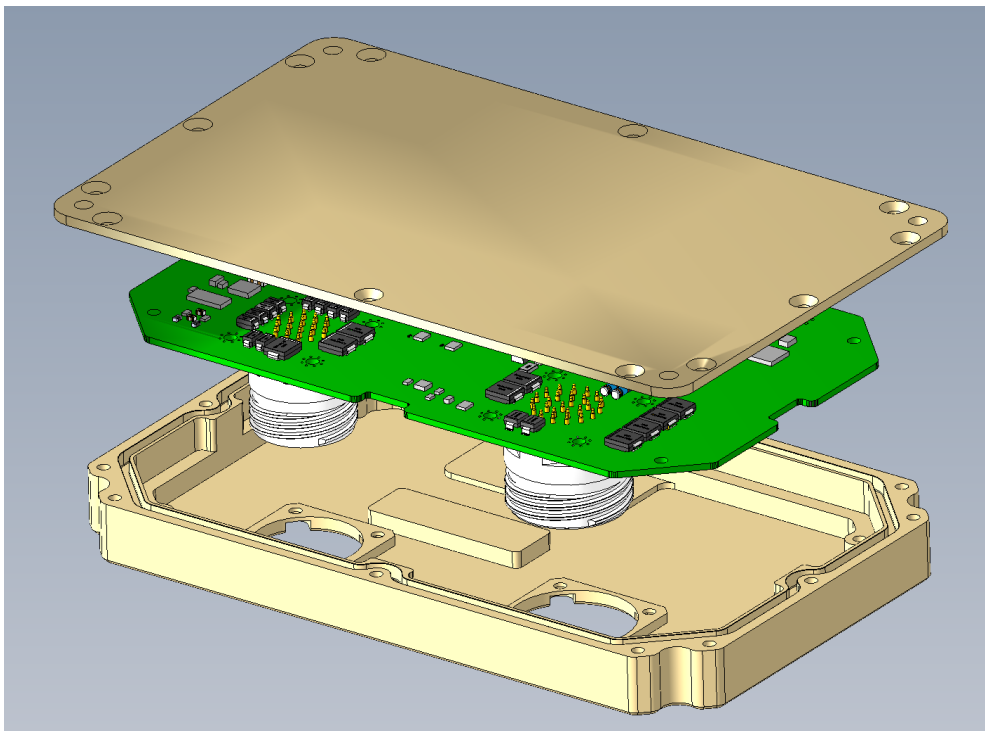


Рисунок 4.5 Моделювання корпусу

12) мінімальні відстані між вузлами, які необхідно компоновати, слід вибирати з урахуванням можливості застосування автоматів для встановлення, кріплення та електромонтажу.

Варіанти компоновання представлені масштабно-компоновальним ескізом (рис. 4.6).

4.6 Забезпечення надійності на етапі компонування

Розташування основних частин пристрою, яке було встановлене при компонуванні, в подальшому вже не може піддаватися істотним змінам. Відповідно до цього і причини ненадійності пристрою, пов'язані з розташуванням частин, важко усунути.

Істотним недоліком компонування є його «рихлість», нещільне заповнення деталями всього об'єму. Якщо навіть «рихлість» і не є безпосередньою причиною зниження надійності даного пристрою, то побічно вона може сприяти зниженню надійності тієї складної системи, в яку даний пристрій входить як складовий, оскільки надійність систем сильно залежить від об'ємів, наведених у технічному завданні. Невиправдане збільшення габаритів одного з пристроїв даної системи може викликати необхідність появи надмірно жорстких габаритних обмежень для іншого пристрою.

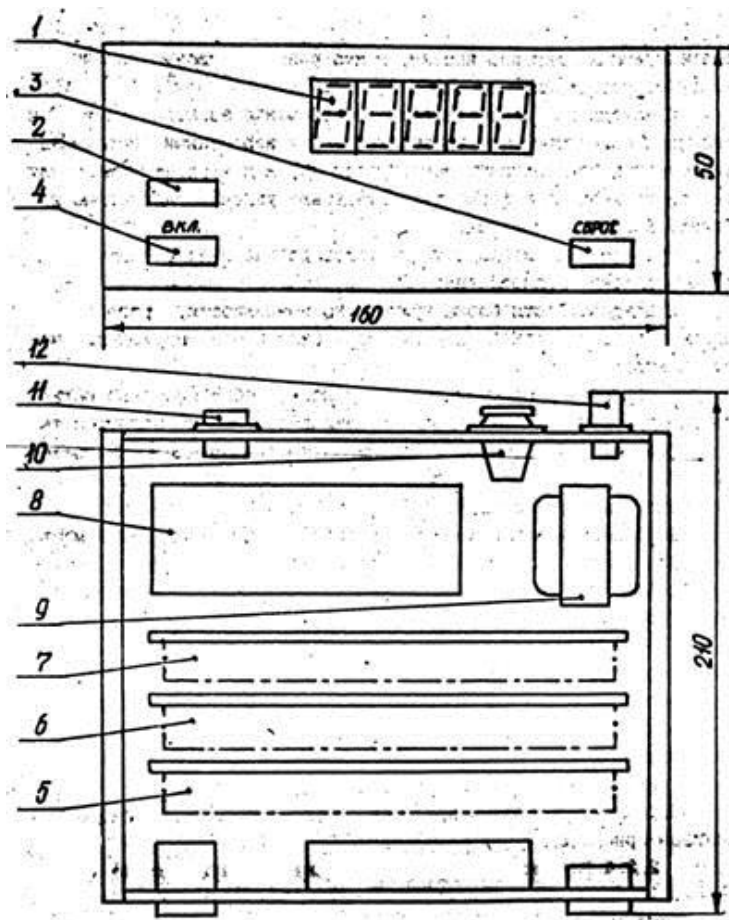


Рисунок 4.6. Масштабно-компонувальний ескіз блоку:

1 – цифрові індикатори; 2 – індикатор; 3 – кнопка "Скидання"; 4 – кнопка "Живлення"; 5 – модуль індикації; 6 – модуль підсилювача; 7 – модуль перетворювача; 8 – модуль живлення; 9 – трансформатор; 10 – запобіжник з тримачем; 11 – з'єднувач X_1 ; 12 – з'єднувач живлення

«Рихлість» – дефект компонування, який найпростіше виявляється, і так чи інакше пов'язаний з надійністю. Але існують чинники, що викликають

ненадійність, джерела яких хоча і пов'язані з розташуванням частин, проте криються глибоко і нелегко виявляються. Це впливає з того, що компоновання пристрою створювалося на основі технічних вимог, які давали можливість абстрагуватися від повторного розгляду конкретних обставин, що породили ці вимоги. Наявність технічних вимог дозволяє конструктору створити систему опорних точок для компоновання. Проте перевірка компоновання по технічних вимогах не може служити перевіркою на надійність. Щоб здійснити таку перевірку, потрібно знов звернутися до аналізу взаємозв'язків пристрою з оточенням, але вже на іншій, уточненій основі.

Так само слід розглянути умови роботи передбачених компонованням елементів, особливо чутливих до температурних дій, тобто елементів, що потребують обігріву, охолодження або стабілізації температурного режиму. Необхідно далі з'ясувати, до яких наслідків може призвести тимчасова відсутність обігріву, охолодження, стабілізації температури цих елементів за різних умов експлуатації і на різних режимах.

Питання герметизації і зв'язок їх з надійністю також належать до тих питань, які повинні розглядатися на етапі компоновання. Поміщаючи апаратуру в герметичні кожухи, можна, здавалося б, якнайкращим способом захиститися від шкідливих зовнішніх дій, але при цьому не можна забувати про цілий ряд негативних чинників, спричинених герметизацією.

При тих або інших поєднаннях умов можуть мати місце наступні негативні чинники герметизації:

- 1) погіршення умов охолодження;
- 2) ускладнення захисту від шкідливих речовин, що виділяються усередині самої апаратури;
- 3) ускладнення і дорожчання конструкції;
- 4) збільшення ваги і габаритів;
- 5) труднощі герметизації виводів (наприклад, штепсельних роз'ємів).

Таким чином, рішення, що стосується герметизації, ухвалюється на етапі компоновання з урахуванням багатьох чинників. Яку б групу взаємозв'язків ми не розглянули, скрізь існують залежні від компоновання тонкощі, що впливають на надійність пристрою.

4.7. Місце встановлення пристрою

Повнота інформації про «місце» є надзвичайно важливою умовою успішного рішення задачі компоновання. Не біда, якщо з ряду причин конструктору не ставлять ніяких обмежень, пов'язаних з «місцем». Навпаки, він відчуває себе вільніше, а отже, може шукати оптимальніші рішення. Справа йде значно складніше, якщо дані про місце встановлення є важливими, але конструктор не має їх в своєму розпорядженні. Подібна ситуація може виникнути при створенні апаратури для ще не спроектованих об'єктів.

Недостатня інформація про місце встановлення вимагає вміння представити його собі узагальнено, а конструкції додати якості, що

забезпечують можливість встановлення пристрою на будь-якому об'єкті. Іноді вдається забезпечити подібну пристосовність пристрою до різних об'єктів за рахунок невеликої кількості перехідних кріпильних деталей, що виконуються кожного разу по-новому. Як правило, чим більші габарити і вага пристрою порівняно з габаритами об'єкту, тим складніша «прив'язка» першого до другого, особливо якщо її розуміти не тільки чисто геометрично, але і ширше. У представленні компонування останнє повинне бути частиною об'єкту, що виконує деяку частку покладених на об'єкт функцій. При такому підході можна говорити, зокрема, і про «жорстку» прив'язку пристрою до об'єкту. Поширена помилка конструктора-початківця – надмірне збільшення жорсткості пристрою без урахування малої жорсткості об'єкту. Така неузгодженість веде іноді до погіршення характеристик комплексної жорсткісної моделі через зайве перевантаження пристрою.

Лекція №5

Методи забезпечення технологічності конструкції БМА Техніко-економічний аналіз конструкції БМА. Поняття технологічності конструкції БМА. Показники технологічності.

Технологічність конструкції — це сукупність властивостей конструкції (виробу), які проявляються у можливості використання оптимальних (найвигідніших техніко-економічних) витрат праці, коштів, матеріалів і часу при технологічній підготовці виробництва, виготовленні, експлуатації та ремонті виробу. Технологічність конструкції виробу характеризує можливість його виготовлення, експлуатації та зберігання за умов використання наявних у виробника та споживача виробу трудових, матеріальних, енергетичних та інших ресурсів. Будь-який виріб повинен бути технологічно раціональним для заданих конкретних умов підготовки його виробництва, виготовлення, експлуатації та ремонту. Ці вимоги слід знати конструктору до початку розробки конструкції виробу.

Вид технологічності визначається ознаками, які характеризують область прояву технологічності конструкції виробу. За цими ознаками розрізняють такі види технологічності:

- технологічність у проектуванні, яка може бути оцінена кількістю уніфікованих вузлів, уніфікацією поверхонь деталей (наприклад, різі, рівців для виходу інструмента тощо), уніфікацією матеріалів, які використовуються;
- виробнича технологічність конструкції виробу виражається в скороченні витрат коштів і часу на: конструкторську підготовку виробництва; технологічну підготовку виробництва; процеси виготовлення, в тому числі контролю та випробувань, а також монтажі за межами підприємства виробника;
- експлуатаційна технологічність конструкції виробу виражається в скороченні витрат часу та коштів на його підготовку до використання, технічне обслуговування, поточний ремонт та утилізацію виробу;
- ремонтна технологічність — технологічність конструкції виробу при всіх видах ремонту, крім поточного.

Технологічність складальних одиниць забезпечується дотриманням наступних вимог:

- конструкція виробу повинна дозволяти незалежне, паралельне складання вузлів різного призначення, що скорочує цикл загального складання;
- конструкція вузла повинна дозволяти складання без необхідності повного або часткового демонтажу уже встановлених елементів;
- за необхідності забезпечення однозначності розміщення елементів, які складають, треба використовувати контрольні штифти, несиметричне розміщення болтів тощо;

- в умовах автоматизованого складання конструкція деталі повинна забезпечувати просте орієнтування у просторі та можливість використання механізованих інструментів (викруток тощо);
- при автоматизованому складанні конструкція виробу повинна дозволяти складання за допомогою нескладних прямолінійних рухів без додаткових обертальних рухів.

При цьому доцільно нерозбірні з'єднання виконувати методами клепання, розвальцювання, склеювання тощо.

5.1 Шляхи та методи забезпечення технологічності конструкції БМА

Для всіх видів виробів за ГОСТ 14.201-83 при відпрацюванні конструкції на технологічність ставляться завдання зниження трудомісткості виготовлення виробу. Вона залежить від багатьох факторів, головними з яких слід вважати:

- стандартизацію — діяльність, що полягає в установленні положень для загального та неодноразового використання щодо наявних чи потенційних завдань і спрямована на досягнення оптимального ступеня впорядкованості в певній сфері;
- уніфікацію (від лат. unus — один, facio — роблю; об'єднання) — приведення до одноманітності, до єдиної форми або системи; раціональне скорочення числа об'єктів однакового функціонального призначення.
- типізацію технологічних процесів виготовлення, технічного обслуговування та ремонту виробу.

До основних конструкторських методів забезпечення технологічності відносяться: 1) використання найбільш простої і відпрацьованої у виробництві конструкторської ієрархії (базової конструкції); 2) вибір розмірів і форми компонентів, деталей і вузлів конструкції з урахуванням економічно доцільних для заданих умов виробництва способів формоутворення, при цьому враховується, що прогресивні способи формоутворення, використовувані в масовому і серійному виробництві, дозволяють зменшити матеріаломісткість виробів за рахунок зменшення товщини елементів конструкції і скорочення відходів; 3) зменшення числа рівнів розукрупнення конструкцій БМА і вибір їх форми і розмірів з урахуванням уніфікованого оснащення і стандартного устаткування; 4) зменшення номенклатури використовуваних матеріалів і напівфабрикатів; 5) зменшення застосування дефіцитних або токсичних матеріалів, дорогоцінних металів; 6) обґрунтований вибір якості точності, шорсткості поверхні, настановних і технологічних баз; 7) конструктивна і функціональна взаємозамінність вузлів, мінімізація числа підстроюваних і регульованих елементів (особливо з механічним підстроюванням); 8) контролепридатність та інструментальна доступність елементів, деталей і вузлів (зокрема підстроюваних), особливо при автоматизованому і механізованому виготовленні.

Ієрархічність є одним з найважливіших способів підвищення технологічності конструкції і обумовлена наступними технологічними міркуваннями.

1. При збільшенні ступеня інтеграції ІС крім економічної доцільності різко зростає відсоток браку і відповідно вартість виробництва; часто приймають, що допустимий відсоток виходу придатних інтегральних схем, які повторно запускаються у виробництво, має бути не нижче 10%. При нижчому відсотку виходу придатних ІС слід понизити ступінь інтеграції.

2. При поділі всієї конструкції на окремі конструктивно закінчені частини з'являється можливість організувати одночасне виготовлення окремих частин і тим самим скоротити тривалість спільного циклу виготовлення на рівні окремих вузлів.

3. Полегшують доступ до окремих частин конструкції при виготовленні та ремонтпридатність при експлуатації.

Характер конструкторської ієрархії визначається: економічно доцільною функціональною складністю БМА і числом рівнів її розукрупнення, загальним числом об'єднаних вузлів (елементарних вузлів (комірок), блоків, шаф); характером конструкторсько-технологічних рішень, прийнятих для даного виду ієрархії. Конструкторська ієрархія дозволяє поліпшити технологічність конструкції шляхом скорочення числа рівнів розукрупнення, їх типізації і уніфікації, організації добре оснащених спеціалізованих виробництв, типових технологічних процесів (ТП) для кожного рівня, автоматизації конструювання і виготовлення з використанням ЕОМ і роботів. Проте конструкторська ієрархія призводить до втрати щільності компонування, збільшення маси, габаритів і вартості БМА (необхідні додаткові роботи по зборці та електромонтажу конструкції), зниження надійності через введення додаткових несучих і монтажних елементів.

При розробці конструкції повинні враховуватися особливості ТП, особливо високопродуктивних. Форма, розміри, точність виготовлення, шорсткість поверхні деталей і вузлів вибираються з урахуванням особливостей використовуваних ТП.

Конструктор, орієнтуючись на той або інший ТП, винен враховувати його надійність. Найбільшу надійність мають автоматизовані операції виготовлення і контролю виробів, що забезпечують високу точність підтримки режимів ТП виготовлення і контролю. На неавтоматизованих етапах виготовлення виробів, де визначальними є дії операторів, виникають більшість дефектів готової продукції.

Особливо важливо автоматизувати і забезпечити точність дотримання режимів таких операцій, результати яких не можуть бути виявлені безпосередньо після їх здійснення; недотримання режимів операцій у свою чергу, може призвести до появи прихованого браку виробів. Прикладом операції, результат якої важко проконтролювати безпосередньо, є створення нероз'ємних контактних з'єднань на всіх рівнях конструкції БМА (паяння електрорадіоелементів на платах, паяння або накрутка монтажних проводів на

монтажних панелях і т. д.). При виконанні просочувальних робіт можливі відхилення вакууму, тиску, температури, часу. Якщо через недостатню температуру в процесі сушки в обмотці залишиться волога, то може відбутися обрив проводу внаслідок електрохімічної корозії. Якщо при опресовуванні ІС полімером мала температура або час витримки, то полімеризація буде неповною і вологозахисні властивості полімерної оболонки погіршуються.

Ухвалені конструктивні рішення багато в чому визначають надійність виробів. При цьому прагнуть до максимально можливої типізації і уніфікації конструкцій, використання нормованих геометричних розмірів, що дозволяє створити універсальне оснащення для різних за призначенням вузлів. Це скорочує час підготовки виробництва при запуску нового вигляду виробів. Під типізацією розуміють зведення всього можливого різноманіття конструктивних рішень до невеликого числа. Уніфікація означає використання одних і тих же конструкцій для створення апаратури різного призначення, тобто розширення області використання типових рішень.

Типізація вузлів здійснюється або лише за конструкторсько-технологічними обмеженнями (габарити і форма частин, число контактів роз'ємів, тип електромонтажу, число шарів комутації і т. д.), або і за конструктивно-технологічними, і за функціональними ознаками (регістр, дешифратор, мікропроцесор, запам'ятовуючий пристрій, модулятор, компаратор, генератор і т. д.).

У першому випадку конструктивна типізація дозволяє зменшити до мінімуму число рівнів розукрупнення і, відповідно, число ТП і кількість технологічного оснащення, краще оснастити ТП і ретельніше його налагоджувати (створити типовий ТП). У другому випадку використання функціонального принципу спрощує і обслуговування апаратури при експлуатації, зменшує номенклатуру блоків, контрольного обладнання, запасного комплекту. Негативною стороною будь-якої типізації є можливість появи надмірності. При конструктивно-технологічній типізації можливе неповне заповнення вузлів елементами через обмежене число контактів в з'єднувачах. Функціональна типізація може привести до неповного використання всіх елементів через те, що частина їх (наприклад, вихід дешифратора або каскадів підсилювача) у деяких вузлах може не використовуватися. Окрім втрат об'єму це призводить до збільшення споживаної потужності і зменшення надійності.

Одним із завдань типізації є раціональний вибір обмеженого параметричного ряду базових конструкцій з початкового ряду, визначеного державним або галузевим стандартом. Початковими даними для вибору є:

1) функція попиту (потреби) базової конструкції того або іншого типорозміру $W=f_1(x)$;

2) функція вартості (витрат) на базову конструкцію того або іншого типорозміру $x:C=f_2(x)$;

3) функція втрат на адаптацію при використанні базових конструкцій більшого або меншого розміру $A=f_3(x)$.

При виборі оптимального параметричного ряду базових конструкцій критерієм оптимальності є найменші сумарні витрати $\min (\Sigma WC + \Sigma A)$.

Більш загальним критерієм оптимальності є максимум середнього економічного виграшу від впорядкування виробництва БМА при проектуванні і впровадженні параметричного ряду.

Особлива увага при розробці конструкції повинна звертатися на обмеження номенклатури матеріалів, зменшення дефіцитних і токсичних матеріалів, дорогоцінних металів, матеріаломісткості виробів. Так, доцільно комутацію елементів ІС виконувати не золотом, а алюмінієм або міддю. Це, однак, не виключає застосування при необхідності підкладки із сапфіра або інших рідкісних матеріалів. Небажано використовувати в конструкції такі токсичні матеріали, як оксид берилію і деякі компаунди (наприклад, КТ-102), оскільки заходи по забезпеченню техніки безпеки ускладнюють підготовку виробництва, але в технічних обґрунтованих випадках вони можуть бути використані.

Технологічність конструкції БМА забезпечується на всіх етапах розробки. При узгодженні ТЗ визначають вимоги по технологічності БМА в цілому (уніфікація, типізація, спадкоємність), встановлюється зв'язок показників БМА і техніко-економічних вимог з використанням нових матеріалів і ТП. На етапі технічної пропозиції розробляються варіанти розчленовування конструкції БМА, визначають запозичені і оригінальні деталі, очікуваний рівень технологічності конструкції. На етапі ескізного проекту детальніше уточнюються розчленовування конструкції, використовувані типові конструкції, параметри матеріалів, способи базування деталей і регулювання вузлів, можливості використання типових технологічних процесів, заходи щодо зручності обслуговування, номенклатура змінних і ремонтних деталей. На етапі технічного проекту виявляється можливість застосування покупних виробів, стандартних, освоєних виробництвом деталей і вузлів і забезпечення технологічності складних деталей; визначаються методи обробки деталей, можливість паралельної і незалежної збірки вузлів і деталей; оцінюється можливість застосування типових і групових ТП; відпрацьовується конструкція деталей, призначених для обслуговування і ремонту; забезпечується мінімізація пригоночних і налагоджувальних робіт. На етапі робочої документації уточнюється номенклатура уніфікованого кріплення і типових елементів; аналізується можливість забезпечення технологічності збірки (виключення проміжного розбирання, вибір способів базування і фіксації, методів регулювання); встановлюються економічно доцільні способи отримання заготовок; проводиться поелементний відрібок конструкції деталей і вузлів на технологічність.

На всіх етапах розробки конструкції починаючи з технічної пропозиції проводиться контроль конструкторської документації на технологічність. На етапі технічної пропозиції перевіряється правильність вибору розчленовування конструкції на вузли і деталі відповідно до вимог технологічності; на етапі ескізного проекту уточнюється компоновка (простота, спадкоємність

конструкції, зручність виготовлення, монтажу, регулювання, відповідність марок використовуваних матеріалів встановленому переліку); на етапі технічного проекту оцінюється можливість паралельної збірки і контролю вузлів виробу і всього виробу в цілому, технологічність збірки виробу і його вузлів, забезпечення взаємозамінюваності складальних вузлів і деталей; мінімізується об'єм дороблювальних робіт. На етапі робочої документації слід звертати увагу на наявність складальних баз деталей і вузлів, вимоги точності виконання розмірів і забезпечення необхідної шорсткості поверхні деталей, технологічність використовуваних видів виробництва.

5.2 Техніко-економічний аналіз конструкції БМА

Для оцінки заходів по підвищенню технологічності конструкції БМА проводиться техніко-економічний аналіз, в результаті якого встановлюється техніко-економічний ефект, обумовлений впровадженням нової техніки і технології з урахуванням додаткових витрат на проектування і підготовку виробництва. Техніко-економічний ефект виявляється у вигляді економії витрат і задоволення потреб людей у наданні медичних послуг. Основною передумовою підвищення економічного ефекту як при виготовленні, так і при експлуатації є підвищення технологічності конструкції.

Розрізняють виробничу, експлуатаційну і ремонтну технологічність конструкції. Виробнича технологічність визначає об'єм робіт з технологічної підготовки виробництва, складність виготовлення, зручність монтажу поза підприємством-виготівником; експлуатаційна технологічність визначає об'єм робіт при підготовці виробу до використання за призначенням, технічному ремонту і утилізації (поверненню у виробництво відходів); ремонтна технологічність характеризує властивості виробу при всіх видах ремонту, окрім поточного.

Технологічність конструкції визначається на основі показників технологічності, які розрізняються: по області прояву (виробничі, експлуатаційні); цілях аналізу (технічні, техніко-економічні); системі оцінки (базові, розроблюваної конструкції); способу вираження (абсолютні, відносні); ступені значущості (основні, додаткові); кількісному характеру (часткові, комплексні). Деякі показники можуть мати різновиди. Так, виробнича технологічність конструкції виробу характеризується конструкторськими і технологічними показниками технологічності.

Конструкторські показники визначають конструктивну спадкоємність – сукупність властивостей виробу, що характеризується повторюваністю в ньому складових частин, що відносяться до виробів даної класифікаційної групи, і наявністю нових складових частин, обумовлених його функціональним призначенням, а також деякі вимоги до складності ТП збірки.

5.3 Показники технологічності

ГОСТ 14.202-83 виділяє основні і додаткові показники технологічності. До основних показників відносять:

- трудомісткість виготовлення виробу (сумарні витрати праці на здійснення технологічних процесів виготовлення виробу);
- технологічну собівартість виробу (частина собівартості виробу, яка визначається сумою витрат на здійснення технологічних процесів виготовлення виробу).

Додаткові показники технологічності поділяють на такі:

- техніко-економічні — відносна трудомісткість видів робіт: заготівельних, механічних, складання тощо;
- технічні (конструкторські), що оцінюють конструкцію як виробу в цілому, наприклад: коефіцієнт уніфікації вузлів/деталей, коефіцієнт стандартизації деталей, коефіцієнт точності та ін.

Технологічність конструкції може бути оцінена і на підставі рекомендацій щодо конструкції заготовок (товщина стінки для виливків, перепад діаметрів при кутанні тощо).

Деякі конструкторські показники технологічності конструкції:
коефіцієнт застосовності деталей

$$K_{\text{нд}} = 1 - D_{\text{тр.ор}} / D_{\text{тр.общ}} ,$$

де $D_{\text{тр.ор}}$ — число типорозмірів оригінальних деталей; $D_{\text{тр.общ}}$ — загальне число типорозмірів деталей без урахування кріплення;

коефіцієнт застосовності електрорадіоелементів (ЕРЕ)

$$K_{\text{н..эрэ}} = 1 - H_{\text{тр.ор.эрэ}} / H_{\text{тр.эрэ}} ,$$

де $H_{\text{тр.ор.эрэ}}$ — загальне число типорозмірів оригінальних ЕРЕ; $H_{\text{тр.эрэ}}$ — загальне число типорозмірів ЕРЕ;

коефіцієнт застосовності вузлів

$$K_{\text{не}} = 1 - E_{\text{тр.ор}} / E_{\text{тр}} ,$$

де $E_{\text{тр.ор}}$ — число типорозмірів оригінальних вузлів; $E_{\text{тр}}$ — загальне число типорозмірів вузлів у виробі;

коефіцієнт повторюваності деталей і вузлів

$$K_{\text{пов.де}} = 1 - (D_{\text{т}} + E_{\text{т}}) / (D + E) ,$$

де $D_{\text{т}}$ і $E_{\text{т}}$ — загальне число типових деталей і вузлів у виробі;

коефіцієнт повторюваності ЕРЕ

$$K_{\text{пов.эрэ}} = 1 - H_{\text{тр.эрэ}} / H_{\text{эрэ}} ,$$

де $H_{тр.эрэ}$ – число типових ЕРЕ у виробі; $H_{эрэ}$ – загальне число ЕРЕ у виробі;
коефіцієнт повторюваності ІС і мікрозборок

$$K_{пов.ИС} = 1 - H_{тр.ИС} / H_{ИС} ,$$

де $H_{тр.ИС}$ – число типорозмірів корпусів ІС і мікрозборок; $H_{ИС}$ – число ІС і мікрозборок;
коефіцієнт повторюваності друкованих плат

$$K_{пов.пп} = 1 - H_{тр.пп} / H_{пп} ,$$

де $H_{тр.пп}$ – число типорозмірів друкованих плат; $H_{пп}$ – число друкованих плат;
коефіцієнт повторюваності матеріалів

$$K_{пов.м} = 1 - H_{мм} / D_{тр.ор} ,$$

де $H_{мм}$ – число маркосортаментів;
коефіцієнт використання ІС і мікрозборок

$$K_{исп.ИС} = H_{ИС} / (H_{ИС} + H_{эрэ});$$

коефіцієнт установочних розмірів

$$K_{ур} = 1 - H_{ур} / H_{эрэ}$$

де $H_{ур}$ – число видів установочних розмірів ЕРЕ;
коефіцієнт складності друкованих плат

$$K_{с.пп} = 1 - H_{мпп} / H_{пп} ,$$

де $H_{мпп}$ – загальне число багатошарових друкованих плат;
коефіцієнт освоєності деталей

$$K_{осв} = 1 - D_{ор} / D ,$$

де $D_{ор}$ – число оригінальних деталей;
коефіцієнт складності збірки

$$K_{с.сб} = 1 - E_{тр.сн} / E_{тр} ,$$

де $E_{тр.сн}$ – число типорозмірів вузлів, що вимагають регулювання або підгонки у складі виробу з використанням спеціальних пристроїв або сумісної обробки з розбиранням і повторною збіркою; $E_{тр}$ – загальне число типорозмірів вузлів.

Лекція № 6

Що таке ергономіка і її вплив на конструкцію БМА. Основи композиції зовнішнього вигляду приладу.

6.1 Що таке ергономіка і її вплив на конструкцію БМА

Ергономіка, Ергономія (грец. έργος — праця і νόμος — закон) (англ. *ergonomics, human engineering*; нім. *Ergonomik f, Ergonomie f*) — наука, яка комплексно вивчає особливості виробничої діяльності людини в системі «людина-техніка-довкілля» з метою забезпечення її ефективності, безпеки та комфорту. Це область науково-прикладних досліджень, що знаходяться на стику технічних наук, психології і фізіології праці, в якій розробляються проблеми проектування, оцінки та модернізації системи «людина - колектив-машина - середовище - соціум - культура – природа» [1]. Ергономіка займається комплексним вивченням і проектуванням трудової діяльності з метою оптимізації знарядь, умов і процесу праці, а також професійної майстерності. Перші дослідження, з якими безпосередньо пов'язують зародження ергономіки, відносять до 20-их років. 20 ст., коли у Великобританії, США, Японії та деяких інших країнах фізіологами, психологами, лікарями та інженерами робилися спроби комплексного вивчення людини в процесі трудової діяльності з метою максимального використання її фізичних і психологічних можливостей та подальшої інтенсифікації праці. Термін «ергономіка», запропонований ще в 1857 польським натуралістом В. Ястшембовський, отримав широке поширення після 1949, коли група англійських учених на чолі з К. Марелла організувала ергономічне дослідницьке товариство, з яким зазвичай пов'язують формування ергономіки як самостійної наукової дисципліни. [4]. З середини 50-х років. вона інтенсивно розвивається в багатьох країнах світу: створена Міжнародна ергономічна асоціація (1961), в якій представлено понад 30 країн; раз на три роки проводяться міжнародні конгреси по ергономіці; в Міжнародній організації з стандартизації утворений технічний комітет «Ергономіка». У Великобританії з 1957 видається журнал «Ergonomics», що став офіційним органом Міжнародної ергономічної асоціації, а також журнали «Applied Ergonomics» (з 1969) і «Ergonomics Abstracts» (з 1969); журнали ергономічного профілю видаються також у Болгарії, Угорщині, США, Франції. У Великобританії, Канаді, Польщі, Румунії, США, Франції, ФРН і Японії розробляють навчальні програми і ведеться підготовка фахівців в області ергономіки в університетах та інших вищих навчальних закладах. На жаль, повною мірою ідея інтеграції зусиль різних фахівців у галузі вивчення праці так і не реалізувалася, що свідчить про складність цього питання, і про необхідність пошуку нових підходів у цьому напрямку. Предметом ергономіки є трудова діяльність, а об'єктом дослідження - системи «людина – колектив - машина - середовище - соціум - культура - природа». Цю систему часто називають «ергономічною системою».

Ергономіка так чи інакше пов'язана з усіма науками, предметом досліджень яких є людина як суб'єкт праці, пізнання і спілкування. Ергономіка не може абстрагуватися від проблем взаємозв'язку особистості з умовами, процесом і знаряддями праці, які є предметом вивчення психології праці. Вона тісно пов'язана з фізіологією праці, яка є спеціальним розділом фізіології, присвяченим вивченню змін функціонального стану організму людини під впливом його робочої діяльності та фізіологічному обґрунтуванню наукової організації його трудового процесу, сприяє тривалому підтриманню працездатності людини на високому рівні. Ергономіка використовує дані гігієни праці, яка є розділом гігієни, що вивчає вплив виробничого середовища і трудової діяльності на організм людини і розробляє санітарно-гігієнічні заходи щодо створення здорових умов праці. Ергономіка за природою своєю займається профілактикою охорони праці, під якою розуміють комплекс правових, організаційних, технічних, економічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки праці та збереження здоров'я працюючих.

Ергономіка вирішує також ряд проблем, поставлених у системотехніці: оцінювання надійності, точності і стабільності роботи оператора, дослідження впливу психологічної напруженості, втоми, емоційних факторів і особливостей нервово-психічної організації оператора на ефективність його діяльності в системі «людина-машина», вивчення пристосувальних і творчих можливостей людини.

У практичному відношенні проблема взаємин ергономіки і системотехніки - це проблема організації всебічного та професійного обліку ергономічних факторів на різних етапах створення систем (проектування, виготовлення, випробувань, впровадження) та їх експлуатації. Ергономіка не може ефективно вирішувати поставлені перед нею завдання без тісних зв'язків з промисловою соціологією, соціальною психологією та іншими суспільними науками. Поза цими зв'язками ергономіка не може ні повноцінно розвиватися, ні правильно прогнозувати соціальний ефект від впровадження розроблюваних нею рекомендацій. Дана група наук у певному відношенні опосередковує взаємозв'язок ергономіки з економікою. Ергономічний підхід до вивчення трудової діяльності не дублює досліджень, проведених у сфері психології, фізіології та гігієни праці, але спирається на них та доповнює їх. [2]. Комплексний підхід, характерний для ергономіки, дозволяє одержати всебічне уявлення про трудовий процес і, тим самим, відкриває широкі можливості для його вдосконалення. Саме ця сторона ергономічних досліджень представляє особливу цінність для наукової організації праці, при якій практичному впровадженню конкретних заходів передують ретельний науковий аналіз трудових процесів і умов їх виконання, а самі практичні заходи базуються на досягненнях сучасної науки і передової практики.

У розвитку ергономіки можна виділити кілька етапів. Завданням першого етапу стало підвищення продуктивності праці. Людину розглядали як

певного виду ресурс. Завдання полягало в найбільш повному використанні її можливостей для конкретного технологічного процесі і в відсів непридатних для даної роботи. Основний зміст ергономічної роботи на першому етапі полягав у тому, щоб з'ясувати, володіє чи не володіє дана людина можливостями для виконання певної роботи і якщо має, то визначити, наскільки інтенсивно її можна експлуатувати. Звідси і основні проблеми: стомлюваність, індивідуальні особливості, відбір, профорієнтація і т.п. Ідеологами цього етапу були Ф. Тейлор, Г. Мюнстерберг, В. Штерн, І.М. Шпількейн, А.К. Гаст, П.М. Керженцев, В.М.Бехтерев, С.Т. Геллерштейн та ін.. Окремо стоять автори, які розглядали завдання не підвищення продуктивності праці, а попередження зривів. Зрив трактувався ними не як наслідок відсутності відповідної властивості, а як наслідок функціонування в граничних для людини умовах. Звідси виникає ідея зменшення граничності, розриву між можливостями людини та вимогами до неї, іншими словами, узгодження людини і техніки, забезпечення нормальності умов праці.

У результаті метою ергономічного аналізу стало з'ясування обмежень можливостей людини і закономірностей функціонування досліджуваних процесів, а не можливостей того, на що людина здатна. Завдання аналізу людських можливостей стала більш «безкорисливою», дослідницькою. Якщо раніше розглядалися властивості людини в процесі праці (реального або імітованого), то тепер предметом стала сама людина – її властивості та функції. Це дало можливість дійсно погоджувати властивості людини і машини. Людина перестала бути ресурсом, а стала компонентом системи.

Наступним етапом розвитку ергономіки є експансія її на інші, крім праці, яка в сучасному виробництві змінює свою якість, сфери діяльності: дозвілля, навчання і т.д. Вона починає враховувати навіть національні особливості працюючого контингенту та стає «необхідним і основним компонентом планування та розробки проектів, які пов'язані із взаємодією людей і машин».

Методи ергономічного аналізу. перспективи розвитку ергономіки. Ергономіка належить до тих наук, які можна розрізняти за предметом і специфічним поєднанням методів, що застосовуються. Методологічну базу ергономіки становить системний підхід. Він дозволяє використовувати в ергономічному дослідженні в тому чи іншому поєднанні методи різних наук, на стику яких виникають і вирішуються якісно нові проблеми вивчення систем «людина і машина». Таким чином, ергономіка значною мірою використовує методи досліджень, що склалися в психології, фізіології та гігієні праці. Проблема полягає в координації різних методичних прийомів при вирішенні тієї чи іншої ергономічної проблеми, в подальшому узагальненні та синтезі отриманих за їх допомогою результатів. У ряді випадків цей процес призводить до створення нових методів досліджень в ергономіці, відмінних від методів тих дисциплін, на які вона спиралася. Розмірковуючи про методи ергономічного аналізу, Є. Б. Моргунов виділяє наступні **критерії для їх типології:**

З точки зору цілей методи можуть бути: **аналітичними та проектувальними**. [4]. При цьому аналітичні методи застосовують раніше ніж проектувальні, тому що на початку проводиться виявлення структури діяльності, а вже потім розробляються заходи, які роблять діяльність користувача більш ефективною.

З точки зору «роздільної здатності» методів виділяють:- **виробничі** методи (використовуються, коли діяльність «береться в повному обсязі», в процесі «її реального виконання»); **лабораторні** методи (якщо аналізуються окремі складові діяльності) [4]. Недолік лабораторного підходу в тому, що часто «за деревами» (частковими характеристиками діяльності) не видно самого «лісу». Тому краще використовувати два даних підходи у поєднанні і розумному чергуванні.

З точки зору способу отримання даних виділяють **об'єктивні та суб'єктивні** методи. [4]. Суб'єктивні методи, використовувані «безпосередньо від людей», суттєво доповнюють дані, отримані «за допомогою дослідницького обладнання» (об'єктивні). Виділяють також: емпіричні та експериментальні методи. [4]. В емпіричних методах дослідник лише тим чи іншим способом спостерігає і реєструє реальну діяльність, тоді як експериментальні методи передбачають активний вплив на неї за допомогою комбінацій тих чи інших визначальних умов. Емпіричні та експериментальні методи також застосовують в деякій черговості.

Один з найважливіших напрямків в ергономіці, наприклад, пов'язаний з проектуванням предметного світу для людей з фізичними вадами. Найбільш інтенсивно ергономіка розвивалася в рамках військово-промислового комплексу.

6.2 Основи композиції зовнішнього вигляду приладу

При зовнішньому компонуванні блоку виконують розміщення пристроїв керування, індикації та налаштування на лицьовій і на інших панелях блоку із забезпеченням вимог ергономіки і технічної естетики.

Основна вимога при зовнішньому компонуванні БМА - максимальне забезпечення зручностей роботи людини-оператора з урахуванням його антропометричних, фізіологічних, психологічних даних. Важливо пам'ятати, що вимоги зручності стосуються не тільки періоду безпосереднього спілкування людини з БМА при функціонуванні апаратури, а й до періоду технічного обслуговування.

Поряд із зазначеними вимогами на даний час набувають все більшого значення естетичні фактори, під якими розуміють художню виразність виробу, його гармонійність, цілісність, відповідність середовищу, де буде експлуатуватися БМА, стилю, часу, моді, красу колірного рішення окремих частин і виробу в цілому. Слід мати на увазі, що для категорії побутових БМА естетичні фактори виступають на перший план. Якщо такі етапи

конструкторської розробки, як виділення структурних рівнів конструкції розробка просторової структури, виконуються інженером-конструктором, то зовнішнє компоновання виконується ним спільно з конструктором-дизайнером.

При цьому широко використовують методи художнього конструювання, застосування яких забезпечує гармонію форми і змісту, загальну художню виразність і цілісність сприйняття виробу.

Важливо пам'ятати, що на лицьовій панелі слід розташовувати лише найнеобхідніші засоби керування, індикації і налаштування. Пристрої регулювання, призначені для періодичного налаштування, слід виводити «під шліц». Рукоятки, тумблери, індикатори, гнізда повинні бути забезпечені написами, які розташовують таким чином, щоб їх можна було читати при користуванні виробом.

Рекомендується застосовувати залежно від конкретних особливостей блоку один з наступних принципів розміщення засобів керування на лицьовій панелі:

1) за функціональними зв'язками засоби керування, коли останні групуються, виходячи із спільності розв'язуваних завдань;

2) за черговістю виконуваних операцій, коли засоби керування розміщують у суворій відповідності з послідовністю їх використання;

3) за частотою використання, коли найчастіше використовувані засоби керування розміщують в центрі панелі;

4) за значимістю, коли найбільш важливі засоби керування, навіть рідко використовувані, розташовують в центрі панелі.

При виборі того чи іншого принципу необхідно враховувати наступні **вимоги**:

1) максимальне скорочення кількості траєкторій робочих рухів;

2) розміщення послідовно використовуваних засобів керування на одній висоті по горизонталі або на одній лінії по вертикалі;

3) зведення робочих рухів до рухів пальців рук, кисті та передпліччя, але не тулуба;

4) ручка що обертається повинна розміщуватися під індикатором або праворуч від нього;

5) необхідно дотримуватися суміщення напрямків руху засобів керування й індикатора.

Методами художнього конструювання - пропорційністю, масштабністю, контрастом, метричним повтором, кольоровою гамою - підкреслюють виразність конструктивного рішення.

Необхідно врахувати, що зовнішнє компоновання повинно бути органічно пов'язаним з внутрішнім компонованням блоку. Відповідно до цього може бути рекомендована така послідовність компоновання блоку. Спочатку вибирають варіант компоновання передньої панелі, намічають "вхід" і "вихід" блоку за основним сигналом. Потім виконують внутрішнє компоновання блоку. Якщо розглянуті варіанти не задовольняють вимогам ТЗ, то виконують новий варіант розміщення засобів керування і відповідний варіант внутрішнього компоновання. Таким чином, відшукавши оптимального конструктивного

рішення є ітеративним процесом. Варіанти компоновання лицьової панелі зображують у вигляді ескізу на міліметровому папері.

Варіант розташування засобів керування, індикації і підключення представлений на рисунку 6.1. Виконання ескізного креслення блоку.

При графічному компонованні розроблений варіант компоновання блоку доцільно представити у вигляді масштабно-компоновального ескізу, який рекомендується виконати на міліметровому папері в масштабі, зручному для показу взаємного розташування модулів (1: 1 або 1: 2). На фронтальній проекції рекомендується зобразити лицьову панель з показом розташування засобів керування, налаштування та індикації. На інших проекціях показують розташування модулів (вузлів); останні зображують спрощено тонкими контурними лініями без показу елементів кріплення. Всі модулі й елементи, зображені на компоновальному ескізі за допомогою виносних ліній, позначають цифрами, а на вільному полі ескізу наводять розшифрування прийнятих цифрових позначень. На ескізному кресленні необхідно проставити основні габаритні розміри блоку.

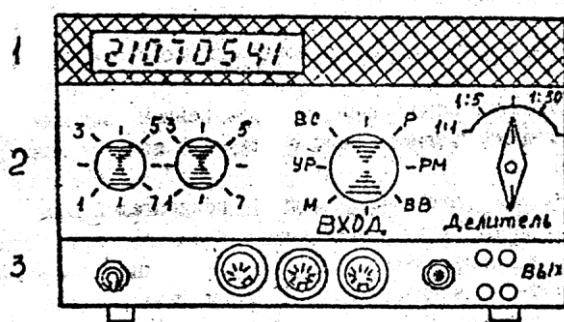


Рис. 6.1. Варіант розміщення засобів керування, індикації та підключення:

- 1 – зона розміщення засобів індикації;
- 2 – зона розміщення засобів керування;
- 3 – зона підключення

Список літератури

1. Дружинін В.М. Структура і логіка психологічного дослідження. М.: Інститут психології РАН, 1994. С. 163.
2. Клімов О.О. Образ світу в різнотипних професіях. М.: Изд-во МГУ, 1995. С. 224.
3. Моргунов Є.Б. Людські фактори в комп'ютерних системах. М.: Тривола, 1994. С. 272.
4. Мюнстенберг Г. Психологія і вчитель. М.: Досконалість, 1997. С. 320.

Лекція 7

Захист конструкції БМА від динамічних механічних навантажень. Механічні впливи у конструкціях РЕА та БМА. Математичні моделі механічних впливів. Математичні моделі систем амортизації

7.1 Механічні впливи у конструкціях РЕА та БМА

Радіоелектронна апаратура, встановлена на рухомих об'єктах, у процесі експлуатації, а також стаціонарна апаратура під час транспортування до місця встановлення, потрапляє під вплив вібрацій та ударів. Залежно від зовнішніх умов частота вібрацій може досягати від одиниць до тисяч герц, а перевантаження в десятки разів можуть перевищувати силу тяжіння [8]. Це може призвести до порушення як механічної цілості апаратури, так і до її передчасних відмов. Оскільки безвідмовність функціонування апаратури є одним із основних завдань, яке постійно повинен мати на увазі конструктор впродовж усіх етапів її проектування, то необхідно створити найсприятливіші умови для роботи деталей, елементів і вузлів апаратури, а також розробити способи захисту від зовнішніх впливів. Результатом механічного впливу може бути явище цієї ж природи, що й вплив, або іншої [1]. Наприклад, механічний вплив може призвести до зміни електричних параметрів чи характеристик апарату, або ж викликати зміну у його розмірах, жорсткості елементів конструкції, тощо. Крім того, можуть виникати зворотні зв'язки (деформація радіоелементів змінює електричні режими, що, в свою чергу, змінює величину та інші характеристики деформації). Коли зворотний зв'язок замикається на явище, яке стало причиною його появи, то можливе виникнення особливого стану в явищі — резонансу. Деколи це спричиняє руйнування апарату. Джерело механічного впливу може міститися в самому апараті або зовні. Виникають також ланцюжки явищ, причиною появи яких є механічний вплив, які часто замикаються у вигляді петель зворотного зв'язку.

Найпоширенішим засобом захисту апаратури від механічних впливів є амортизація, проте вона має ряд особливостей, без врахування яких не можна досягти бажаного ефекту. Амортизаторами прийнято називати систему пружних опор, на які встановлюють об'єкт з метою захисту його від зовнішніх динамічних дій. Основна властивість таких опор (амортизаторів) полягає в тому, що коливання несучої конструкції, які виникають під дією зовнішніх джерел механічних впливів, передаються апаратурі через пружні опори значною мірою ослабленими. Ця властивість амортизаторів має свої обмеження, пов'язані з особливостями поведінки пружної системи [9].

У результаті встановлення апаратури на пружні амортизатори виникає коливальна система, утворена амортизованим об'єктом і його пружними опорами. Позитивний ефект амортизації забезпечується правильним вибором характеристики цієї системи, що дозволяє якнайкраще використовувати її властивості.

Розробка амортизаторів, невеликих габаритів, здатних захистити апаратуру від вібрацій і ударів – досить складне технічне завдання. Проектування системи амортизації, розташування амортизаторів на об'єкті, врахування взаємодії об'єкту з системою амортизації також вимагає уважного підходу. Успіх вирішення всіх цих питань можливий лише при всебічному врахуванні конструктивних особливостей амортизаторів і апаратури, а також при правильному оцінюванні характеру носія динамічних впливів.

Теоретична сторона проектування системи амортизації ґрунтується на загальних положеннях теорії коливань і теорії удару [9].

7.2 Математичні моделі механічних впливів [9]

Вплив механічних коливань на конструкцію радіоелектронного апарату та його елементи доцільно вивчати з оглядом на електричні аналогії. Моделювання дає змогу досліджувати механічні впливи на рівні їх джерел, проявів, результатів. Найпростішою моделлю амортизатора є коливальний контур. Якщо обмежитися лише малими механічними коливаннями пружно закріпленого твердого тіла, що не деформується, то коливання можна означити як процес, при якому відбувається систематична знакоперемінна зміна величини, яка характеризує механічний рух, що відбувається в часі відносно деякого стабільного положення.

Основними параметрами, що характеризують коливальний процес, є частота і амплітуда коливань.

У зв'язку з тим, що в аналізі коливань систем амортизації суттєва роль належить математичним моделям у вигляді синусоїдальних (гармонічних) функцій, необхідно розглянути в загальних рисах властивості цих функцій [9].

Синусоїдальна функція може бути представлена у вигляді вектора, що обертається, як показано на рисунку 7.1.

Нехай точка R рухається по колу проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю ω , причому відлік часу починається від моменту, при якому $\theta = \varphi$, тоді біжуче значення кута $\theta = \omega t + \varphi$. Проекція вектора OR на вертикальну вісь Y буде змінюватися відповідно до виразу

$$U(t) = A \sin \theta.$$

Кожен поворот вектора OR містить 2π рад. Крива повторюється через інтервали $T = 2\pi/\omega$. За цей час точка R повністю обходить коло і повертається у вихідне положення. Час проходження точки по колу є періодом T функції, яка тому і називається періодичною.

Довжина A вектора OR або найбільше абсолютне значення, якого досягає гармонічна коливальна величина, називається **амплітудою** гармонічного коливання. Амплітуда збігається з його піковим значенням.

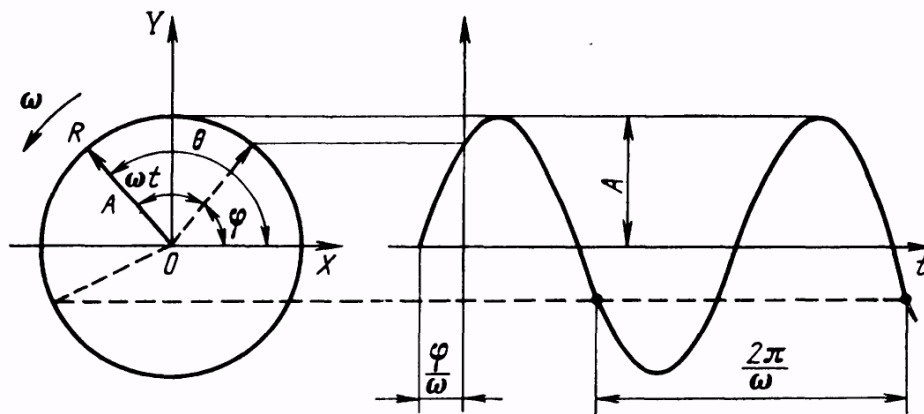


Рисунок 7.1. Гармонічне коливання, подане у вигляді проекції вектора OR , що обертається

Кут φ називають **фазовим кутом**. Зміна фазового кута спричиняє лише зсув синусоїди уздовж координати часу. Значення фазового кута невелике, якщо розглядати одну синусоїдальну функцію, оскільки його можна виключити з розгляду змінивши початковий відлік часу. При аналізі двох і більше синусоїдальних функцій фазовий кут грає істотну роль у визначенні залежності між гармонічними величинами.

Ступені вільності. Числом ступенів вільності механічної системи (у нашому випадку амортизованого об'єкту) називається мінімальне число незалежних координат, необхідних для повного визначення положення всіх точок системи у будь-який момент часу. Хоча для реальних механічних систем це число завжди нескінченно велике, але у ряді випадків практично достатньо враховувати скінченне число істотних ступенів вільності. Найчастіше воно дорівнює числу можливих незалежних переміщень.

Таким чином, якщо об'єкт має можливість переміщатися поступально в тривимірному просторі в будь-якому напрямі, то він має три ступені вільності. Об'єкт, який переміщається поступально в площині, має два ступені вільності.

Найбільш простою (хоча і не завжди досить точною) є зображення механічної системи у вигляді системи з одним ступенем вільності, тобто такої системи, для якої потрібна лише одна координата, аби повністю визначити її положення у будь-який момент часу.

Система з багатьма ступенями вільності — це така система, для якої потрібно дві або більше координат, для повного визначення її положення у будь-який момент часу.

Сили, що діють при коливаннях. Змінні сили, що діють при коливаннях амортизованого об'єкту, різноманітні за своєю природою і за тією роллю, яку вони відіграють у коливальних процесах. Ці сили поділяють на збуджуючі, відновлюючі, сили тертя (опору).

Збуджуючі сили — це зовнішні сили, які є деякими функціями часу і викликають вимушені коливання системи амортизації, на яку вони діють.

Рух, примусово заданий яким-небудь точкам системи амортизації, є причиною кінематичного збурення коливань. Ці коливання відбуваються так, ніби до даної системи було прикладено деяку еквівалентну збурюючу силу.

Відновлюючі сили виникають при відхиленнях системи амортизації від положення рівноваги і прагнуть повернути її в це положення. Вони залежать лінійно або нелінійно від переміщень системи і не лише впливають на рух системи, але і залежать від цього руху. Коливальні властивості систем амортизації обумовлені в основному наявністю відновлюючих сил.

Кількісним показником, що характеризує відновлюючі властивості амортизатора, є статичний коефіцієнт жорсткості k (або статичний коефіцієнт пружності). Він встановлює зв'язок між відновлюючою силою, що виникає в амортизаторі в результаті прикладання статичної зовнішньої сили, і його деформацією. Статичний коефіцієнт жорсткості амортизатора з лінійною пружною характеристикою дорівнює відношенню величини сили тяжіння (навантаження, ваги об'єкту, що амортизується) P , прикладеної до амортизатора, до статичної деформації z_{CT} амортизатора. Іншими словами, статичний коефіцієнт жорсткості визначається навантаженням, вираженим у кілограм-силах (кГ), яке треба прикласти до амортизатора, аби отримати деформацію 1 мм:

$$k = P / z_{CT} .$$

Третій вид змінних сил, що діють при коливаннях, - це сили тертя, які залежать від швидкості коливання (принаймні від його знаку) і завжди направлені протилежно до напрямку руху. Найчастіше сили тертя сприяють „гасінню” коливань.

Розсіяння енергії коливання в результаті дії сили тертя називають **демпфуванням**. Наслідком демпфування є ослаблення власних коливань системи. Величина демпфування виражається коефіцієнтом демпфування h . Зазвичай розрізняють демпфування двох видів: „в'язке” і „сухе”.

В'язким демпфуванням називається розсіяння енергії, яке відбувається, коли система амортизації опирається руху з силою, пропорційною величині швидкості об'єкту і направленою в бік, протилежний до його руху.

Сухе демпфування здійснюється в такій системі амортизації, в якій опір руху відбувається в результаті сили сухого тертя, величина якої постійна і незалежна від величини переміщення або величини швидкості, а напрям протилежний до напрямку швидкості.

Розрізняють внутрішнє тертя в матеріалі і зовнішнє тертя між частинами конструкції та опір середовища. Особливо велике тертя виникає в демпферах. Характер залежності сил тертя від швидкості визначається природою тертя. Таку залежність називають характеристикою тертя.

Параметри гармонічних коливань. Переміщення амортизованого об'єкту, що виконує простий гармонічний рух, визначається рівнянням

$$U(t) = A \sin \omega t . \quad (7.1)$$

Швидкість і прискорення об'єкту знаходять з рівняння (7.1) обчисливши першу і другу похідні від $U(t)$ відповідно:

$$v(t) = U'(t) = \omega A \cos \omega t , \quad (7.2)$$

$$a(t) = U''(t) = -\omega^2 A \sin \omega t . \quad (7.3)$$

Максимальні величини амплітуди переміщення, швидкості і прискорення об'єкту, який рухається за гармонічним законом, можна отримати у тому випадку, коли значення тригонометричних функцій у рівняннях (7.1) — (7.3) дорівнюватимуть одиниці. Ці максимуми описують наступними співвідношеннями:

$$U(t) = A, \quad v(t) = \omega A, \quad a(t) = \omega^2 A . \quad (7.4)$$

Амплітуда прискорення вимірюється в міліметрах за секунду в квадраті (мм/с^2) або частках прискорення вільного падіння $g = 9810 \text{ мм/с}^2$.

У характеристиках коливальних процесів часто зустрічається термін „**вібраційне перевантаження**”, під яким мають на увазі безрозмірне відношення величини даного прискорення до прискорення вільного падіння. Іншими словами, вібраційне перевантаження показує, в скільки разів дане прискорення відрізняється від прискорення вільного падіння.

Рівняння (7.4) зручніше записати через частоту, виражену в герцах. Підставляючи $\omega = 2\pi f$ у рівняння (7.4), отримуємо:

$$U(t) = A, \quad v(t) = 2\pi f A, \quad a(t) = 4\pi^2 f^2 A . \quad (7.5)$$

Для синусоїдального руху значення амплітуди прискорення, амплітуди переміщення і частоти коливань пов'язані співвідношенням:

$$a(t) = 4\pi^2 f^2 A .$$

Розділивши обидві частини цієї рівності на прискорення вільного падіння g , отримаємо залежність амплітуди прискорення, виражену в частках g :

$$j = (4\pi^2 / 9810) f^2 A ,$$

або приблизно

$$j \approx f^2 A / 250 . \quad (7.6)$$

Приклад. Нехай при частоті $f=52$ Гц амплітуда коливань об'єкту $A=0,3$ мм, тоді відповідно до формули (7.5) амплітуда прискорення

$$U''(t) = 4 \cdot 3,14^2 \cdot 52^2 \cdot 0,3 \approx 32000 \text{ мм/с}^2.$$

або в частках прискорення вільного падіння

$$j = 32000/9810 = 3,26g.$$

Аналогічний результат може бути отриманий при обчисленні за формулою (7.6). Відповідне вібраційне перевантаження $N=3,26$.

7.3 Математичні моделі систем амортизації

7.3.1. Коливальна лінійна система з одним ступенем вільності

При розрахунку системи амортизації необхідно правильно, відповідно до фізичного змісту, скласти математичний опис руху механічної системи залежно від її параметрів, сил, що діють, і початкових умов.

Будь-яка реальна механічна система – це складна сукупність елементів, яка в загальному вигляді не піддається точному математичному опису. Тому, зазвичай, створюють деяку фізико-механічну ідеалізацію, замінюючи реальну систему подібною (моделлю), яку можна використовувати для достовірного вирішення поставлених завдань із заданою точністю.

У найпростішому випадку об'єкт, що амортизується, і амортизатори, що підтримують його, утворюють систему, схематично показану на рисунку 7.2 [9].

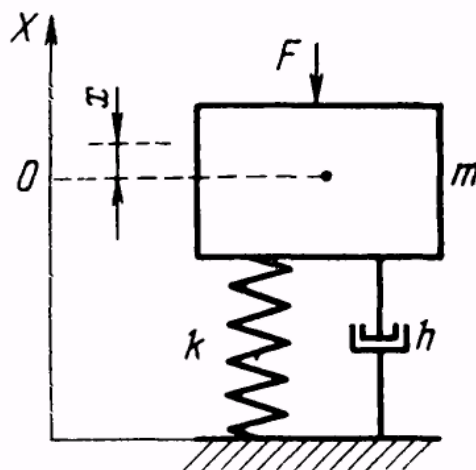


Рисунок 7.2. Коливальна амортизована система,

Така коливальна система складається з інерційного елемента, масою m , встановленого на пружині з коефіцієнтом пружності k і демпферу з коефіцієнтом демпфування h , які закріплені безпосередньо на основі [9]. Силу збурення, яка діє на неї, позначено F .

При дослідженні таких систем у найпростішому випадку вводять наступні раціональні припущення і умови:

- динамічна дія на об'єкт, що амортизується, здійснюється лише прямолінійно і уздовж однієї з осей координат;
- маса основи настільки більша, ніж маса об'єкту, який амортизується, що зворотним впливом можна знехтувати;
- маса пружного елементу настільки менша за масу об'єкту, який амортизується, що нею можна знехтувати;
- основа і об'єкт, який амортизується, настільки жорсткі, що їх деформаціями можна знехтувати;
- маса об'єкту, що амортизується, коефіцієнт жорсткості і коефіцієнт демпфування пружного елементу є величинами постійними, такими, що не змінюються з часом;
- сила пружності пропорційна до деформації амортизатора;
- сила опору амортизатора пропорційна першому степеню швидкості переміщення об'єкту, що амортизується.

Таким чином, тіло масою m може переміщатися у напрямі осі X так, що його положення повністю визначатиметься єдиною координатою x . Тому таку систему називають пружною системою з одним ступенем вільності.

Якщо таку механічну систему вивести яким-небудь чином із стану рівноваги або надати їй деяку швидкість, то під дією інерційних і пружних сил у системі виникнуть коливальні рухи, які здійснюватимуться без додаткової дії зовнішніх сил. Такі коливання називаються вільними (власними) коливаннями системи. Кількісною мірою цих коливань є частота вільних коливань f_0 , виражена в герцах.

Якщо коливання системи відбуваються в результаті постійно-діючої зовнішньої сили F , прикладеної або безпосередньо до тіла масою m , або до основи, або ж виникають у результаті постійного руху основи, то такі коливання називають вимушеними.

7.3.1.1 Вільні коливання без демпфування

Розглянемо вільні коливання недемпфованої системи. Запишемо рівняння сил, що діють на тіло масою m . Сила mx'' , яка виникає в пружно-закріпленому тілі, рівна за величиною і протилежна за напрямом до сили kx , з якою пружина діє на масу:

$$mx'' = -kx, \quad (7.7)$$

де $x = 0$ визначає положення рівноваги амортизованого тіла.

Розв'язок рівняння (7.7) можна подати у вигляді :

$$x = C_1 \sin \omega_0 t + C_2 \cos \omega_0 t, \quad (7.8)$$

де C_1 і C_2 — сталі інтегрування, які визначають із початкових умов; ω_0 — кутова частота вільних коливань, яку визначають із виразу $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

Якщо коливання тіла відбувається по синусоїді, то інтервал часу, протягом якого завершується один повний цикл, називають періодом коливання: $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$.

Величина, обернена до періоду, називається частотою вільних коливань:

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kg}{P}}, \quad (7.9)$$

де $P = mg$ — вага твердого тіла.

У рівнянні (7.8) коефіцієнт C_2 визначають за величиною початкового переміщення x_0 у початковий момент часу $t = 0$, а коефіцієнт C_1 рівний v_0/ω_0 при $t = 0$. Таким чином, переміщення x_0 і швидкість v_0 в початковий момент часу, повністю визначають коливальну систему.

Рівняння (7.8) може бути записане в наступному вигляді:

$$x = A_0(\sin \omega_0 t + \varphi_0), \quad (7.10)$$

де амплітуда вільних коливань:

$$A_0 = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = \sqrt{v_0^2/\omega_0^2 + x_0^2},$$

а фазовий кут

$$\varphi_0 = \arctg(C_2/C_1) = \arctg(x_0\omega_0/v_0),$$

Статичне переміщення простої пружно закріпленої системи визначається переміщенням пружини (з коефіцієнтом жорсткості k), яке виникає в результаті дії сили тяжіння на об'єкт $z_{CT} = mg/k$. Підставивши цей вираз у рівняння (7.9), отримуємо:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{z_{CT}}} \approx \frac{15,8}{\sqrt{z_{CT}}}. \quad (7.11)$$

Ця залежність застосовна лише в тих випадках, коли система лінійна.

7.3.1.2 Вільні коливання з демпфуванням

Диференціальне рівняння руху масою m для демпфованої системи має вигляд:

$$mx'' + h + kx = 0. \quad (7.12)$$

Розв'язок цього рівняння залежить від співвідношення між коефіцієнтом демпфування h і так званим коефіцієнтом критичного демпфування

$$h_{KP} = 2\sqrt{km} = 2m\omega_0.$$

Уведемо відношення $\zeta = h/h_{KP}$, яке називають відносним коефіцієнтом затухання.

При цьому, якщо демпфування системи менше, ніж критичне, тобто $\zeta < 1$ (субкритичне затухання), то розв'язок рівняння (7.12) матиме вигляд:

$$x = e^{-ht/2m} (C_1 \sin \omega_h t + C_2 \cos \omega_h t),$$

або

$$x = A_0 e^{-ht/2m} \sin(\omega_h t + \varphi_0).$$

де $C_1 = \left(v_0 + \frac{h}{2m} x_0 \right) / \omega_h$ $C_2 = x_0$, амплітуда A_0 і фазовий кут φ_0

визначають так само, як у рівнянні (7.10)

Частота власних коливань демпфованої системи пов'язана з частотою власних коливань недемпфованої системи рівністю:

$$\omega_h = \sqrt{\omega_0^2 - h^2/4m^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}.$$

При $\zeta = 1$ коливання взагалі відсутні, а при $\zeta > 1$ виникає, так званий, неперіодичний рух, при якому, якщо система відхилена від положення рівноваги, вона прагне поступово повернутися в первинне положення. Два останніх співвідношення між коефіцієнтами h і h_{KP} зазвичай не зустрічаються в практиці віброізоляції.

7.3.1.3 Вимушені коливання. Якщо на систему амортизації діє зовнішня сила (силове збурення) або задано рух окремих точок системи без розгляду причин, які викликають їх рух (кінематичне збурення), то в пружній системі виникають вимушені коливання.

Обидва види збурень діють незалежно від коливань у самій системі. У цих випадках енергія надходить у систему ззовні. У результаті виникає реакція системи (так званий відгук), яка може виражатися по-різному залежно від характеру збурення.

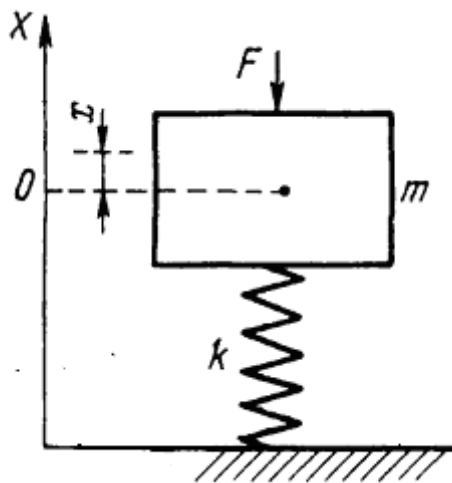


Рисунок 7.3. Коливальна система під впливом зовнішнього збурення

Коли частота вимушених коливань збігається з частотою власних коливань, виникає явище, при якому навіть незначні збурюючі коливання призводять до збільшення амплітуди коливань в системі. Це явище називається резонансом. Резонанс відбувається в результаті того, що внутрішні сили пружної системи майже повністю взаємно зрівноважуються. Вся енергія зовнішніх сил йде на збільшення потенціальної і кінетичній енергії пружної системи, яка при цьому вібрує з наростаючою амплітудою. Найбільшого значення амплітуда вимушених коливань досягатиме у момент резонансу.

За відсутності демпфування в амортизаторах амплітуда вимушених коливань системи могла б досягти нескінченно великого значення. Проте цього не відбувається, оскільки сили опору в амортизаторах не дорівнюють нулю.

7.3.1.4 Вимушені коливання без демпфування

7.3.1.7.1 Силowe збурення. Якщо синусоїдальна сила $F(t) = F \sin \Omega t$ прикладена до недемпфованої коливальної системи масою m з одним степенем вільності, (рис. 7.3), то диференціальне рівняння руху матиме вигляд:

$$mx'' + kx = F \sin \Omega t.$$

Розв'язок цього рівняння:

$$x = C_1 \sin \omega_0 t + C_2 \cos \omega_0 t + A \sin \Omega t.$$

Перші два члени цієї рівності представляють вільні коливання без демпфування з частотою $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

У реальній фізичній системі власні коливання з частотою ω_0 в результаті дії демпфування поступово затухають. Сталі вимушені коливання змінюватимуться за законом:

$$x = A \sin \Omega t, \quad (7.13)$$

де амплітуда коливань: $A = \frac{F}{k} |1 - \Omega^2 / \omega_0^2|^{-1}$.

Сила, яка впливає на основу, прямо пропорційна пружному прогину:

$$F_{CT} = kx.$$

Підставляючи x з рівняння (7.13), можна визначити відношення статичної пружної сили до амплітуди сили збуджуючих коливань $1/\gamma = F_{CT}/F$ (коефіцієнт динамічності системи):

$$1/\gamma = |1 - \Omega^2 / \omega_0^2|^{-1}$$

Коли частота вимушених коливань збігається з частотою власних коливань $\Omega = \omega_0$ (випадок резонансу), амплітуда коливань x для недемпфованої системи досягає нескінченності.

7.3.1.7.2 Кінематичне збурення. Диференціальне рівняння руху для коливальної системи, зображеної на рисунку 7.4, яка знаходиться під впливом усталеного руху, $\xi(t) = \xi \sin \Omega t$ має вигляд:

$$mx'' = -k[x - \xi(t)].$$

Розв'язок цього рівняння:

$$x = C_1 \sin \omega_0 t + C_2 \cos \omega_0 t + A \sin \Omega t.$$

де коефіцієнти C_1 і C_2 визначаються початковим переміщенням і швидкістю маси в початковий момент часу $t = 0$.

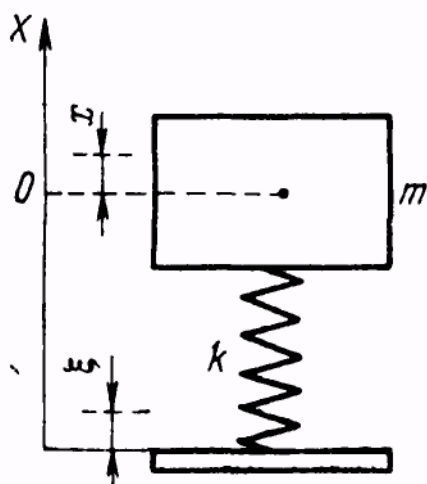


Рисунок 7.7. Кінематичне збурення недемпфованої коливальної системи

Амплітуда вимушених коливань

$$A = \xi |1 - \Omega^2 / \omega_0^2|^{-1}. \quad (7.14)$$

Члени, що представляють коливання з власною частотою, врешті-решт затухають, і відношення амплітуд визначає коефіцієнт динамічності

$$1/\gamma = A/\xi = |1 - \Omega^2 / \omega_0^2|^{-1}.$$

Таким чином, при вимушених коливаннях системи з одним ступенем вільності без демпфування її коефіцієнти динамічності (як за силою, так і за переміщенням) чисельно рівні.

7.3.1.5 Вимушені коливання з в'язким демпфуванням.

7.3.1.5.1 Силowe збурення. Диференціальне рівняння руху для коливальної системи з одним ступенем вільності з в'язким демпфуванням (див. рис. 7.2), до якої прикладено збурюючу силу:

$$F(t) = F \sin \Omega t ,$$

матиме вигляд

$$mx'' + hx' + kx = F \sin \Omega t .$$

Розв'язок цього рівняння може бути записаний у вигляді:

$$x = A_0 e^{-ht/2n} \sin(\omega_h t + \varphi_0) + A \sin(\Omega t - \psi) . \quad (7.15)$$

Перший член виразу (7.15) задає затухаючі вільні коливання, початкова амплітуда яких A_0 і фазовий кут φ_0 визначаються початковими умовами руху. Кутова частота власних коливань із затуханням $\omega_h = \sqrt{\omega_0^2 - \zeta^2}$, де $\zeta = h/h_{KP}$. Другий член виразу (7.15) задає вимушені коливання з частотою зовнішньої сили. Вимушені коливання тривають протягом усього часу дії зовнішньої сили, у той час, як вільні коливання, внаслідок затухання, швидко загасають. При розгляді усталених коливань беруть до уваги лише другий член. Амплітуда коливань у рівнянні (7.15):

$$A = \frac{F}{k \left[\left(1 - \Omega^2 / \omega_0^2 \right) + \left(2\zeta \Omega / \omega_0 \right)^2 \right]^{1/2}} . \quad (7.16)$$

і фазовий кут

$$\psi = \arctg \frac{2\zeta \Omega / \omega_0}{1 - \Omega^2 / \omega_0^2} .$$

Вираз (7.16) може бути перетворений до вигляду:

$$Ak / F = \left[\left(1 - \Omega^2 / \omega_0^2 \right) + \left(2\zeta \Omega / \omega_0 \right)^2 \right]^{-1/2} .$$

Цей вираз показує, у скільки разів амплітуда вимушених коливань A перевищує статичне зміщення F/k .

Коефіцієнт динамічності для системи може бути поданий у вигляді:

$$1/\gamma = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta \Omega / \omega_0)^2}{(1 - \Omega^2 / \omega_0^2) + (2\zeta \Omega / \omega_0)^2}}. \quad (7.17)$$

а фазовий кут

$$\psi = \arctg \frac{2\zeta (\Omega / \omega_0)^2}{1 - \Omega^2 / \omega_0^2 + 4\zeta^2 \Omega^2 / \omega_0^2}. \quad (7.18)$$

Характеристика залежності коефіцієнта динамічності $1/\gamma$ від відношення частоти вимушених коливань до власної частоти $\eta = \Omega / \omega_0$ при різних значеннях відносного коефіцієнта затухання $\zeta = h/h_{KP}$ подані на графіку на рисунку 7.5.

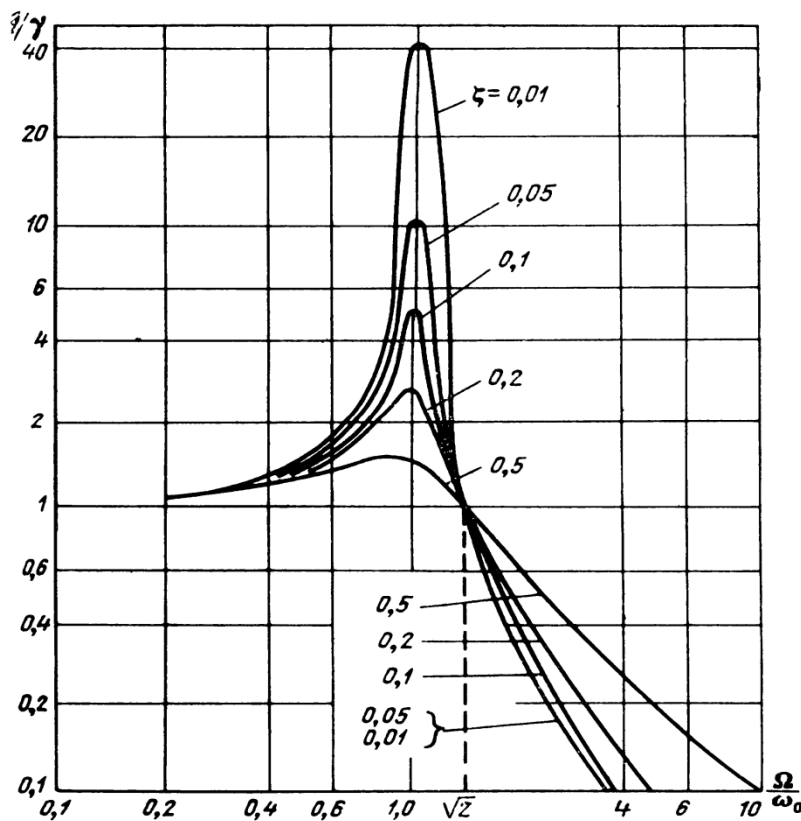


Рисунок 7.5. Значення коефіцієнта динамічності $1/\gamma$

Залежність кута ψ від відношення $\eta = \Omega / \omega_0$ частоти вимушених коливань до власної частоти називають фазочастотною характеристикою. Такі характеристики при різних значеннях затухання зображені на рисунку 7.6.

Із зменшенням сили опору, криві прямують до граничної, такої, що зазнає розриву в точці $\Omega / \omega_0 = 1$, тобто при резонансі. У цій точці для будь-яких значень ζ зсув фази $\psi = \pi / 2$.

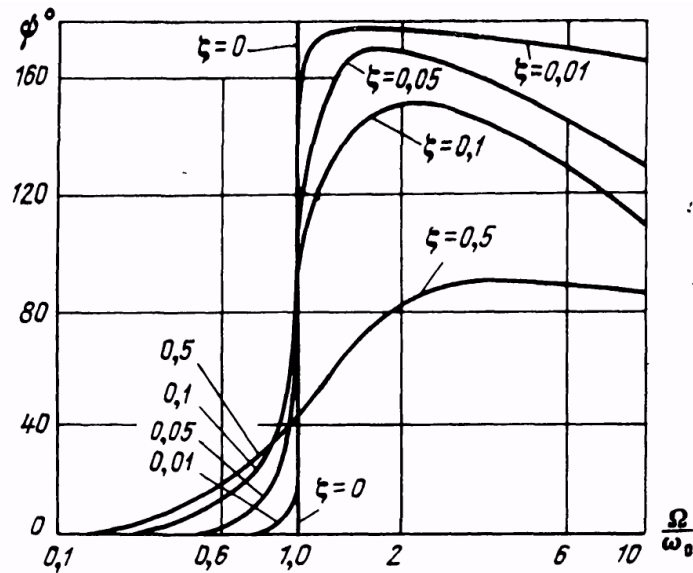


Рисунок 7.6. Характеристики залежності фазового кута ψ від частоти

Якщо значення ξ мале, то при $\Omega < \omega_0$ вимушені коливання майже збігаються по фазі зі збуджуючою силою, а при $\Omega > \omega_0$ знаходяться з нею у протифазі.

Якщо частота Ω змінюється поступово, то фаза вимушених коливань змінюється в області резонансу на зворотну тим різкіше, чим менше загасання в системі.

7.3.1.5.2 Кінематичне збурення. Збурення коливальної системи, показаної на рисунку 7.7, може бути викликане в результаті руху $\xi(t)$ основи. Диференціальне рівняння руху такої системи

$$mx'' + h[x' - \xi(t)] + k[x - \xi(t)] = 0. \quad (7.19)$$

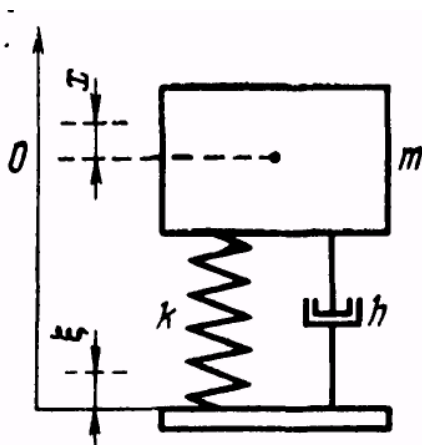


Рисунок 7.7. Кінематичне збурення коливальної системи

Якщо основа здійснює гармонічний коливальний рух $\xi(t) = \xi \sin \Omega t$, то умова усталеного вимушеного коливання після того, як коливання з власною частотою ω_0 затухне, визначається переміщенням маси об'єкту m :

$$x = (1/\gamma)\xi \sin(\Omega t - \psi),$$

де коефіцієнт динамічності $1/\gamma$ визначається з рівняння (7.17), а фазовий кут – з рівняння (7.18).

Коефіцієнт динамічності по переміщенню чисельно дорівнює коефіцієнту динамічності по силі, яка визначається за формулою (7.17). Амплітуда вимушених коливань у рівнянні (7.19) при усталеному режимі:

$$A = \frac{\xi}{m} \sqrt{\frac{h^2 \Omega^2 + k^2}{(\Omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4g^2 \Omega^2}}$$

або

$$A = \xi \sqrt{\frac{1 + \varepsilon^2 \eta^2}{(\eta^2 - 1)^2 + \varepsilon^2 \eta^2}}, \quad (7.20)$$

де показник затухання:

$$\varepsilon = h / \sqrt{km} = 2g / \omega_0 = 2h / h_{kp} = 2\zeta,$$

$\eta = \Omega / \omega_0$ — відношення частоти збурюючих коливань до частоти власних коливань системи іноді називають коефіцієнтом розладки.

Амплітудно-частотна характеристика. Щоб зробити висновок про міру віброізоляції, яку забезпечує система амортизації, вводять динамічний коефіцієнт віброізоляції γ , який дорівнює відношенню амплітуди збурюючих коливань основи до амплітуди вимушених коливань об'єкту, що амортизується. Це відношення може бути виражене через величини сили, переміщення, швидкості або прискорення. Величина $1/\gamma$, як вже вказувалося, називається коефіцієнтом динамічності.

У разі вимушених коливань з дуже малим опором, яким можна нехтувати, коефіцієнт динамічності виражається співвідношенням:

$$1/\gamma = 1/|1 - \eta^2|. \quad (7.21)$$

Якщо демпфуванням нехтувати не можна, то коефіцієнт динамічності дорівнює:

$$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{\frac{1 + \varepsilon^2 \eta^2}{(\eta^2 - 1)^2 + \varepsilon^2 \eta^2}}. \quad (7.22)$$

Якнайповніше уявлення про роботу системи амортизації дає її частотна характеристика, яка відображає залежність коефіцієнта динамічності від відношення частоти коливань, що діють на систему, до частоти власних коливань системи. Із зростанням частоти збурюючих коливань, після переходу через резонанс, амплітуда вимушених коливань зменшується (див. рис. 7.5).

Крім того, чим менший коефіцієнт демпфування h , тим сильніше проявляється резонанс.

Використання демпфування в системі у резонансній області знижує амплітуду вимушеного коливання, а за межами резонансної області воно дещо погіршує роботу амортизації, оскільки збільшує амплітуду коливання порівняно з випадком, коли $h = 0$.

Область частот, для якої $\eta < \sqrt{2}$, де $1/\gamma \geq 1$, є резонансною. Із зростанням частоти вимушених коливань, після переходу через область резонансу, коли $\eta > \sqrt{2}$, амплітуда вимушених коливань стає меншою, ніж амплітуда збуджуючих коливань, тобто $1/\gamma < 1$. Чим більший коефіцієнт розладки η , тим більший коефіцієнт віброізоляції γ .

Очевидно, що амортизатори виконують свою віброізолюючу функцію, лише тоді, коли частоти збуджуючих коливань більші за частоти їх власних коливань не менш, ніж у $\sqrt{2}$ разів. Природно, що в області резонансу амортизатори погіршують умови роботи амортизованого об'єкту.

Таким чином, основна вимога хорошої віброізоляції зводиться до того, щоб при постійній частоті діючої вібрації f , власна частота f_0 коливальної системи, утвореної масою амортизованого тіла і пружними амортизаторами, була якомога меншою, тобто $f_0 \leq f / \sqrt{2}$.

7.3.2 Коливальні лінійні системи з двома (і більше) ступенями вільності

Реальна система амортизації не завжди може бути представлена у вигляді моделі з одним ступенем вільності. На практиці зустрічаються випадки, коли доводиться враховувати пружні зв'язки, що одночасно діють уздовж двох або трьох осей, наприклад, при несиметричному розміщенні амортизаторів. Рух тіла, що амортизується, при цьому здійснюється не лише поступально, по і з поворотом відносно координатних осей. У деяких конструкціях необхідно враховувати вплив пружних і інерційних сил деталей основи або амортизованого блоку на коливання системи. Нарешті, інколи в амортизованому блоці доводиться застосовувати додаткову амортизацію окремих вузлів. Усе це ускладнює завдання віброізоляції і вимагає аналізу коливальних систем, що складаються з двох або більш мас, сполучених певним чином пружними зв'язками, що призводить до виникнення систем з двома або багатьма ступенями вільності із взаємозв'язаними формами коливань. При цьому коливання в одній зв'язаній формі не може відбуватися незалежно від коливань у іншій зв'язаній формі [9].

Для кожного ступеня вільності коливальної системи диференціальне рівняння може бути записане в одній з форм:

$$m_i x_i'' = F_{xi}, \quad J_j \alpha_j'' = M_{\alpha j}, \quad (7.23)$$

де F_{xi} — складова сили у напрямі осі X для всіх зовнішніх пружних і демпфуючих сил, що діють на тіло масою m , з i ступенями вільності, а $M_{\alpha j}$ — складова всіх обертових моментів, що діють на тіло з j ступенями вільності; J_j — момент інерції; α — кут повороту тіла відносно осі.

Рівняння (7.23) аналогічні за формою і можуть бути представлені в загальному вигляді:

$$m_i x_i'' = F_i, \quad (7.24)$$

де F_i — результуюча всіх сил (або моментів), які діють на систему у напрямі i -го ступеня вільності; x_i'' — прискорення (лінійне або кутове) в тому ж напрямі.

Таким чином, члени рівнянь визначають переміщення, швидкість, прискорення системи і прогин амортизатора або при поступальному, або при обертовому русі. Наприклад, якщо систему утворюють n тіл, кожне з яких поступально переміщується в трьох напрямках, то така система має $6n$ рівнянь вигляду (7.24) по одному для кожного ступеня вільності.

Аналіз будь-якої коливальної системи слід починати з вибору математичної моделі, яка повинна мати ті ж динамічні режими, що і досліджувана система.

Необхідно вибрати відповідну кількість і розташування зосереджених мас, жорсткостей і демпферів, а також мають бути відомі сили, які впливають або вид руху основи. Модель повинна мати достатньо ступенів вільності для визначення форм коливання, які мають важливе значення для отримання відповіді про збурюючу силу або рух.

7.3.2.1 Коливальна система з двома ступенями вільності

Для поліпшення віброізоляції вузлів і блоків, які входять у пристрій, амортизований в цілому, їх інколи встановлюють на амортизаторах, укріплених на основній (зовнішній) частині конструкції пристрою. Такий вигляд амортизації називається додатковою (або двоярусною).

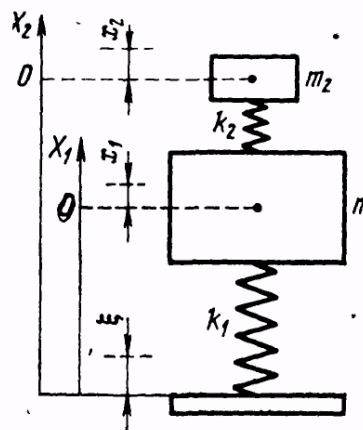


Рисунок 7.8. Коливальна система з двома ступенями вільності

Коливальна система, що утворюється при введенні додаткової амортизації, в загальному випадку має 12 ступенів вільності. При раціональному монтажі зовнішньої та внутрішньої частин відбуватиметься окреме, незалежне збурення коливань по координатах (але попарно), і, таким чином, дослідження зведеться до простішого випадку двох ступенів вільності (рис. 7.8).

Додаткова амортизація викликає появу двох резонансних частот ω_{01}, ω_{02}

Причому область ω_{01}, ω_{02} ширша за область p_1, p_2 (рис. 7.9), що погіршує віброізоляцію основної частини поблизу резонансної області. Додатково амортизована частина в області резонансу також опиняється в гірших умовах, ніж, якби вона була змонтована лише на своїх амортизаторах, або складала єдину конструкцію разом з усім пристроєм. Для локалізації резонансних частот в області низьких частот необхідно прагнути до зменшення обох власних частот p_1, p_2 .

Поза областю резонансу у міру зростання Ω/p_1 наявність додаткової амортизації перестає погіршувати амортизацію зовнішньої частини, а зменшення амплітуди внутрішньої частини відбувається швидше, ніж це було б при підвісі її лише на своїх амортизаторах.

Коефіцієнт віброізоляції γ внутрішньої частини зі зростанням Ω/p_1 прямує до значення, що дорівнює добутку коефіцієнтів віброізоляції кожної частини окремо $\gamma_1 \gamma_2$.

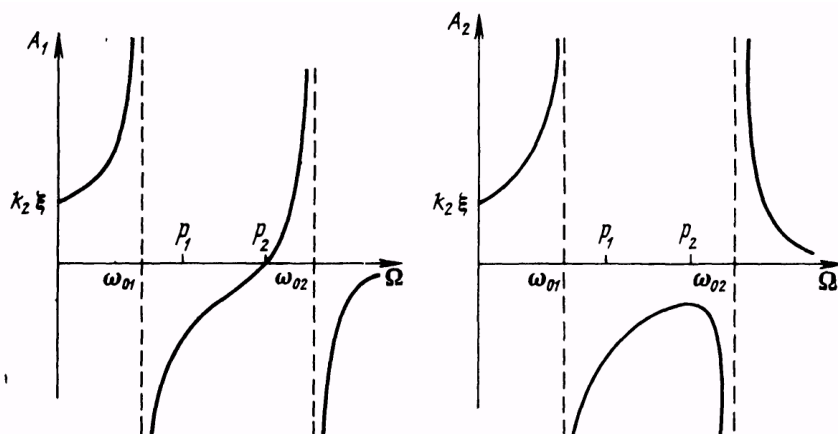


Рисунок 7.9. Частотні характеристики системи з двома ступенями вільності.

Для звуження області резонансу необхідно, щоб маса внутрішньої частини була якомога меншою порівняно з масою зовнішньої частини.

Величини прискорення зовнішньої (основний) частини і додатково амортизованого вузла в одиницях прискорення вільного падіння визначаються за формулами:

$$j_1 = A_1 \Omega^2 / 9810; j_2 = A_2 \Omega^2 / 9810.$$

Застосування для додаткової амортизації амортизаторів жорсткіших (наприклад, гумових прокладок), ніж для основної, може принести значну шкоду замість очікуваної користі.

7.3.2.2 Коливальна система з багатьма ступенями вільності.

Прикладом системи з багатьма ступенями вільності є тіло масою m , підвішене до нерухомої основи на n амортизаторах.

Нехай X, Y, Z — нерухома прямокутна система координат, що має початок у точці, яка співпадає з центром тяжіння ізольованого тіла в його початковому положенні. Осі направлені по головних осях інерції ізольованого тіла. У початковому положенні осі обох систем відповідно збігаються.

Зміщення тіла на амортизаторах малі. Пружні сили, які виникають, пропорційні до деформацій. Пружні елементи амортизаторів настільки малі порівняно з габаритами тіла, що амортизується, що кожен з них можна вважати зосередженим у точці кріплення. Будь-яку пружну деформацію такого елемента можна представити як результат трьох незалежних деформацій по головних напрямках. Коефіцієнти пружності i -го амортизатора у напрямі осей X, Y, Z позначимо через k_{xi}, k_{yi}, k_{zi} .

7.3.3 Коливання нелінійних систем з одним ступенем вільності

На практиці система амортизації не завжди у повній мірі відповідає умовам лінійності. Рух такої системи з великим наближенням може бути описаний нелінійним рівнянням, розв'язати яке, проте, не завжди просто. Тому зазвичай застосовуються деякі допущення, які у більшій або меншій мірі відповідають фізиці явища. Після цього здійснюється лінеаризація задачі, що дозволяє отримати закінчений розв'язок [9].

Нелінійність пружних характеристик амортизаторів може бути зумовлена як фізичними властивостями матеріалу (наприклад, гуми), так і особливостями конструкції амортизатора. Пружні обмежувачі ходу, що запобігають руйнуванню амортизаторів при надмірно великих навантаженнях, призводять до нелінійності навіть у найпростішому випадку, коли для пружного елемента і обмежувача ходу справедлива пропорційна залежність між навантаженням і деформацією.

Прагнення отримати рівночастотний амортизатор, а також необхідність зменшити зміщення апаратури при дії ударних імпульсів значної величини призвели до широкого використання таких пружних елементів, як конічні і експоненціальні пружини, з нелінійною характеристикою. При цьому відновлююча сила зростає швидше, ніж прогин. Така характеристика називається жорсткою.

Навіть в разі циліндричної витої пружини зустрічаються відхилення від умов лінійності при значних деформаціях.

7.3.3.1 Власні коливання нелінійної системи. Якщо нехтувати силами опору, то рівняння руху системи з нелінійною залежністю відновлюючої сили від зміщення в загальному випадку можна представити таким чином: $m\ddot{x} = -F(x)$, де $F(x)$ - відновлююча сила.

Інтегрування цього рівняння дає розв'язок, що описує коливання, які в загальному випадку не будуть гармонічними. Вони називаються вільними псевдогармонічними коливаннями. Повний період, тобто час, за який величина проходить весь цикл зміни від a до $-b$ і назад, дорівнюватиме:

$$T = 2 \int_{-b}^a \left(\frac{2}{m} \int_x^a F(x) dx \right)^{-1/2} dx,$$

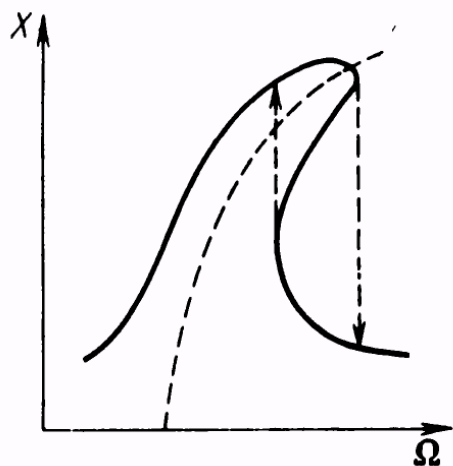
Частота вільних коливань нелінійної системи, як правило, залежить від амплітуди коливань (тобто від початкових умов). Вигляд зв'язку між частотою вільних коливань та їх амплітудою істотно залежить від форми характеристики відновлюючої сили.

7.3.3.2 Вимушені коливання. При дії на нелінійну систему гармонічної зовнішньої сили форма вимушених коливань залежить від амплітуди і частоти коливань сили.

Для розв'язування багатьох нелінійних рівнянь доводиться застосовувати наближені методи.

Графік, що зображає резонансну криву при вимушених коливаннях жорсткої системи з нелінійною відновлюючою силою, в основному відповідає лінійній системі, але витягнутий вправо (рис. 7.10).

На резонансній кривій є ділянка, де неможливо отримати постійну амплітуду, яка відповідала б вимушеній частоті збурення.



При деяких значеннях частоти збурення можливі три значення амплітуди коливання, але реально існувати можуть тільки верхнє або нижнє значення, середнє буде нестійким. При незначній зміні руху виникає стрибок у бік одного з двох стабільних рухів.

У системах амортизації явище стрибка небажане, оскільки при раптовій зміні амплітуди вимушених коливань, різко збільшується прискорення амортизованого об'єкту.

Рисунок 7.10. Резонансна крива жорсткої нелінійної системи

7.4 Динамічні механічні навантаження

Механічні впливи на РЕА в загальному випадку мають випадковий характер, проте для спрощення розрахунків та випробувань при оцінюванні реальних впливів використовують спрощені детерміновані моделі, які

прийнято поділяти на динамічні - вібрації, удари, лінійні прискорення і статичні – навантаження [6].

Багато коливальних процесів, що відбуваються в механічних системах, часто називають вібраціями. Загальновизнаного означення, що точно виділяє вібрацію серед інших механічних коливань, немає. Дуже часто терміни «вібрація» і «механічні коливання» є синонімами [9]. Проте в багатьох галузях техніки під вібрацією найчастіше прийнято розуміти коливальний рух, що спричиняє шкідливий вплив на об'єкт.

Під **вібраціями** будемо розуміти коливання конструкції, викликані періодичними впливами, зокрема незрівноваженими механічними масами [6]. Вони створюються двигунами та рухомими механізмами і також виникають при транспортуванні стаціонарної апаратури до місця експлуатації.

Під вплив вібрацій потрапляє апаратура, розміщена на транспортних засобах та у виробничих приміщеннях.

У результаті вібрації виникають перевантаження:

$$j = \frac{a}{g},$$

де a – прискорення за рахунок вібрації; g – прискорення сили тяжіння.

За модель вібрації, як правило, приймають гармонічний закон:

$$j = 4\pi A f^2 / g,$$

де A - амплітуда, f - частота коливань.

При цьому динамічний вплив (сила), що діє на пристрій кріплення апаратури чи її частини масою m (або вагою P) дорівнює

$$F = ma = Pj.$$

Перевантаження і динамічні сили пропорційні амплітуді вібрацій і квадрату частоти впливу.

Удари – це впливи, що супроводжуються стрибкоподібною зміною швидкості, або інакше – це широкосмуговий вплив, при трактуванні в частотній області і короткий, імпульсний вплив – при трактуванні в часовій області, при цьому кінетична енергія тіл при ударі перетворюється в енергію пружної деформації.

На відміну від гармонічних коливань, удар є неусталеним процесом. Це завдає основної складності при аналізі дії удару на апаратуру і при розрахунку системи амортизації на удар.

Ударом прийнято називати миттєву зміну швидкості руху тіла на скінченну величину за дуже короткий проміжок часу. Удар зазвичай є результатом раптового прикладання сили або несподіваної зміни напрямку чи швидкості руху.

На практиці миттєвої зміни швидкості рухомого об'єкту не буває, проте таке припущення можна прийняти у тому випадку, коли зміна швидкості відбувається протягом малого, порівняно з півперіодом власних коливань даної пружної системи, проміжку часу.

Раптово прикладена сила або раптова зміна руху пружної системи примушує її здійснювати власні та перехідні коливання.

Збудження системи при ударній дії виникає неперіодично у вигляді механічних імпульсів різної форми: прямокутних, трикутних, напівсинусоїдальних (рис. 7.11).

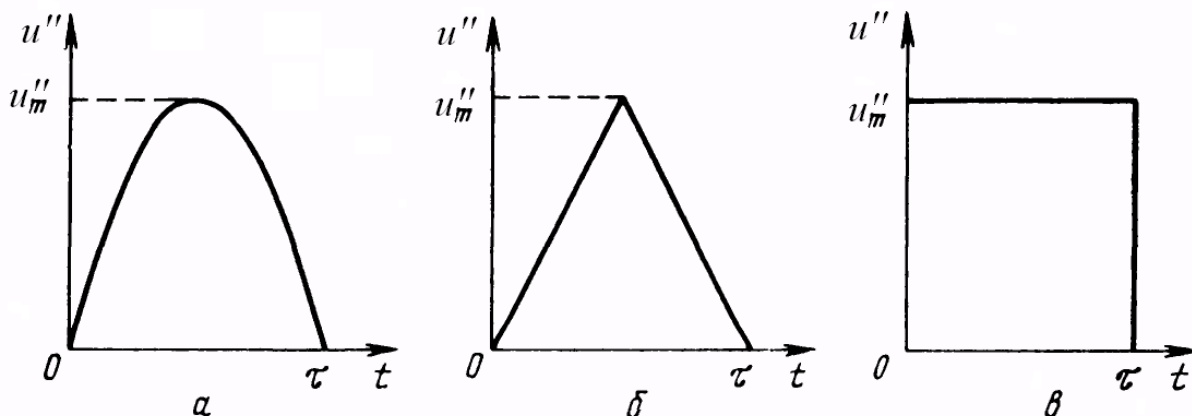


Рисунок 7.11. Ударні імпульси:

а — напівсинусоїдальний; б — трикутний; в — прямокутний

Ділянка наростання імпульсу називається фронтом, ділянка спаду — зрізом [9].

За причиною виникнення розрізняють удари викликані падінням, транспортуванням, зіткненням, вибуховою хвилею.

За характером впливу — періодичні та аперіодичні.

Удари відрізняються від вібрацій тим, що період їх слідування значно більший, ніж час встановлення механічної системи у стан рівноваги. Це дає можливість розглядати зовнішній вплив як одиничний. Протягом часу дії ударного імпульсу $\tau_{имп}$ можуть виникнути вимушені коливання конструкції з великою амплітудою, які після його припинення переходять у вільні коливання. Експлуатаційні норми вібраційних та ударних впливів наведені у ГОСТах.

Лінійні прискорення можна розглядати як часткову модель ударного впливу, коли удар одиничний, а його тривалість $\tau_{имп}$ велика. При цьому приймають, що прискорення основи, на якій встановлено РЕА, змінюється за законом:

$$a_{осн}(t) = \begin{cases} a_{осн}, & 0 < t < \tau_{имп}; \\ 0, & t \leq 0, \quad t \geq \tau_{имп}. \end{cases}$$

Особливістю лінійних прискорень є те, що використання амортизаторів для зменшення їхнього впливу є неефективним.

У результаті вібрацій та ударів відбувається підвищене зношування рухомих частин апарату, ослаблення механічних з'єднань та кріплень окремих елементів конструкції, саморозгвинчування, порушення регулювання, поломки несучої конструкції. Найнебезпечнішим є виникнення механічного резонансу, при якому частота зовнішнього впливу співпадає з власною частотою механічної системи:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{m\Gamma}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}},$$

де $C = \frac{1}{\Gamma}$ - жорсткість конструкції (відношення діючої сили до деформації конструкції, викликаной цією силою); Γ - гнучкість конструкції [5].

Коливання конструкції та її елементів з великими амплітудами можуть викликати недопустимі механічні напруження, що призводять до залишкових деформацій або руйнування. При фіксованому перевантаженні найбільші амплітуди мають місце в низькочастотній області.

Основними конструктивними заходами щодо захисту апаратури від механічних впливів є:

- підвищення міцності конструкції (під міцністю розуміють навантаження, яке може витримати конструкція без залишкових деформацій та руйнування). Можливості цього методу обмежені, оскільки підвищення міцності (за рахунок введення додаткових перегородок, точок кріплення, ребер жорсткості, ускладнення профілю несучої конструкції і т.п.) звичайно супроводжується нарощенням маси, що, в свою чергу, призводить до збільшення динамічних навантажень. Для підвищення міцності, зокрема ударостійкості, доцільно застосовувати матеріали з підвищеною пластичністю;

- налаштування механічної частини РЕА на частоту, відмінну від частоти зовнішньої вібрації шляхом зміни її власної частоти f_0 за рахунок жорсткості та (або) маси. Такий підхід часто застосовують при конструюванні першого структурного рівня;

- встановлення РЕА на пружні опори (амортизатори) з одночасним налаштуванням власної частоти амортизованої системи на діапазон, відмінний від діапазону частот вібраційного впливу. Амортизатор це – пружний елемент, який з'єднує РЕА з віброуючою основою [8]. Цей спосіб ударо- і віброізоляції є головним при конструюванні РЕА. Амортизацію проводять, як правило, на третьому та четвертому структурному рівні. В той же час в приладах, що мають невелику кількість вузлів чи блоків, які необхідно захистити від вібраційних чи ударних впливів, доцільно амортизувати лише ці вузли. Тільки

у дуже важливій апаратурі, що працює в складних умовах експлуатації, амортизують одночасно і весь прилад і його окремі вузли;

- при відсутності технічних можливостей змінити власну частоту механічної частини РЕА з метою зменшення амплітуди коливань при резонансі застосовують демпфування (пом'якшення), тобто зменшення добротності механічної системи за рахунок дисипативних елементів (у вигляді додаткових накладок, ребер жорсткості у конструкціях або додаткових елементів – на схемах), які зміщують власну частоту системи в область вищих частот, оскільки резонанс особливо небезпечний на низьких частотах.

Структурні рівні: 0– елементна база, елементи; 1 – модулі, що не виконують самостійних функцій; 2 – субблок, блок, які можуть виконувати деякі самостійні функції; 3 – виріб в цілому.

Багато електрорадіоелементів (резистори, конденсатори, мікросхеми, напівпровідникові пристрої та ін.) виконані таким чином, що при дотриманні певних вимог до їхнього закріплення, можуть нормально працювати при вібраціях з частотою до кількох тисяч герц. При закріпленні цих елементів тільки на виводи, особливо, якщо довжина виводів велика, можуть виникати резонансні явища, які призводять до виходу з ладу елементів. Тому електрорадіоелементи (ЕРЕ) додатково кріплять за корпус до друкованих плат або до інших елементів конструкції, на якій вони встановлені. Найгірше працюють під впливом високочастотних вібрацій конденсатори змінної ємності, електромагнітні реле, радіолампи (особливо великогабаритні), електромеханічні пристрої, які мають низьку резонансну частоту [8].

Для обґрунтованого вибору способу захисту РЕА від механічних впливів широко використовують моделювання. Наприклад, аналіз електромеханічних систем доцільно проводити з використанням електромеханічних аналогій (див. табл.7.1).

Таблиця 7.1.

Механічна ланка	Електричне коло	
	1–а система аналогій	2–а система аналогій
Переміщення y	Заряд q	Зчеплення магнітних потоків Ψ
Швидкість v	Струм I	Напруга U
Сила F	Напруга U	Струм I
Імпульс (кількість руху) mv	Зчеплення магнітних потоків Ψ	Заряд q
Маса m	Індуктивність L	Ємність C
Запасливість l	Ємність C	Індуктивність L
Опір тертя s	Опір R	Провідність G
Кінетична енергія	$LI^2/2$	$CU^2/2$
Потенціальна енергія	$CU^2/2$	$LI^2/2$

Процеси в лінійному послідовному електричному коливальному контурі під дією зовнішньої напруги $u(t)$ описують за допомогою лінійних диференціальних рівнянь другого порядку.

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C} \int I dt = u(t)$$

або

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \frac{du(t)}{dt},$$

$$LI'' + RI' + \frac{I}{C} = u'(t),$$

де I - струм; L, C, R - індуктивність, ємність та опір втрат контуру.

У цьому рівнянні припускаємо, що опір втрат не залежить від частоти, хоча таке спрощення для механічних систем не завжди допустиме. У першому наближенні можна вважати, що опір механічних втрат постійний при в'язкому демпфуванні. При цьому рівняння, що описує процеси у найпростішому коливальному механічному контурі (системі другого порядку) співпадає за виглядом з попереднім рівнянням для напруги і має вигляд:

$$mX'' + r_M X' + \frac{X}{\Gamma} = F(t),$$

де X – переміщення, r_M – механічний опір, що враховує втрати у коливальній системі.

Переходячи від переміщення до швидкості, отримуємо таке рівняння:

$$v'' + r_M v' + \frac{v}{\Gamma} = F'(t),$$

де v - швидкість переміщення.

Використання методу електромеханічних аналогій корисне для радіоінженерів, оскільки дає можливість розглядати процеси в механічних системах у звичних для них поняттях. Крім того, це дозволяє замінити механічне моделювання більш простим і економним моделювання на еквівалентних електричних схемах. Рівняння, яке описує процеси в механічних системах, при наявності внутрішнього поглинання в пружних елементах системи, приводить до значно складніших електричних аналогів.

7.5 Захист радіоелектронних апаратів від вібрацій

Більшість елементів РЕА можна подати у вигляді коливальної ланки, кожна з яких має власну резонансну частоту f_0 . Поведінка коливальної ланки

при дії на неї зовнішніх вібрацій залежить від відношення частоти цих вібрацій ω до резонансної частоти f_0 .

У загальному випадку РЕА, закріплена на амортизаторах, здійснює складні коливання, які можна зобразити у вигляді суми коливальних переміщень уздовж трьох координатних осей. При цьому розрахунок параметрів коливань виявляється складною задачею. Тому розглядають ідеалізований випадок, для якого типові механічні динамічні вузли РЕА описують коливальною ланкою з одним ступенем вільності [5]. До таких вузлів насамперед відносять амортизатори, кріплення радіоелементів, плат друкованого монтажу тощо. Складніші вузли можна розбити на коливальні ланки, і в межах лінійних деформацій розглядати їх як послідовні, паралельні, послідовно – паралельні та інші з'єднання. Типовою є ланка, зображена на рис. 7.12. На рисунку M_o - маса шасі основи, m_a - маса апаратури, $|v_a|$, $|v_{np}|$, $|v_o|$ — модулі швидкостей апаратури (a), взаємного зміщення кінців пружини (np), основи (o).

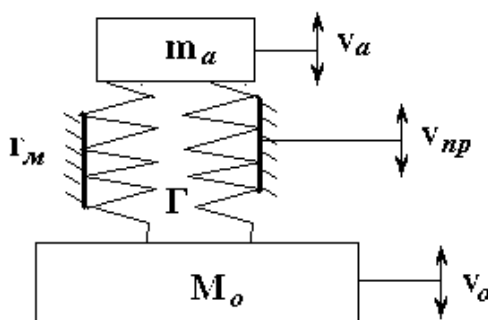


Рисунок 7.12 Коливальна механічна ланка з одним ступенем вільності

Вектори відповідних швидкостей мають точками прикладання центри відповідних мас. Пружні елементи характеризуються гнучкістю G та механічним опором r_m .

Швидкість переміщення основи (шасі) описують вектором v_o , який практично не залежить від параметрів апаратури, тому її електричним еквівалентом буде струм чи напруга (у термінології теорії електричних кіл). При жорсткому закріпленні РЕА на основі, її швидкість дорівнюватиме швидкості основи $v_a = v_o$. При амортизації РЕА через інерцію маси m пружина стискається і розтягується, а швидкість переміщення апаратури стає меншою, ніж швидкість переміщення основи, тобто:

$$v_a = v_o - v_{np}, \quad v_o = v_a + v_{np}.$$

Віброізоляцію оцінюють відношенням швидкості основи до швидкості переміщення апаратури

$$\eta = \left| \frac{v_o}{v_a} \right|.$$

Для лінійних систем при гармонічному впливі це відношення дорівнює відношенню прискорень

$$\eta = \left| \frac{a_o}{a_a} \right|.$$

Фізичний зміст віброізоляції прозорий — вона показує у скільки разів пружина (амортизатор) зменшує вплив коливань основи (шасі) на апаратуру, тобто ця величина безрозмірна.

Коефіцієнт віброізоляції η можна визначити користуючись еквівалентною електричною схемою. Тоді електричною аналогією амортизатора буде паралельний коливальний контур (тут струми — аналогія швидкості — див. першу систему аналогій), у якому індуктивність є аналогією маси апаратури, ємність — аналогією запасливості пружини, а резистор — аналогією втрат на тертя.

Електричну схему, що є аналогією (аналоговою моделлю) амортизатора з одним ступенем вільності, показано на рисунку 7.13.

Усі напруги та струми є функціями від часу. Рівняння струмів має вигляд: $I = I_L + I_C$, або, що є аналогією для механічної ланки:

$$v_o = v_a + v_{\Pi}.$$

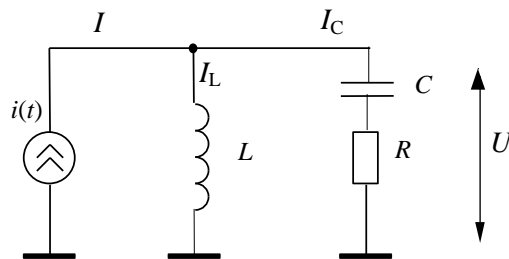


Рисунок 7.13 Електрична модель механічної динамічної ланки першого порядку з одним ступенем вільності

Коефіцієнт віброізоляції дорівнюватиме:

$$\eta = \left| \frac{I}{I_L} \right| = \left| \frac{v_o}{v_a} \right| = \left| \frac{I_C}{I_L} + 1 \right| = \sqrt{\frac{1 + (Q/\gamma)^2(\gamma^2 - 1)}{1 + (Q/\gamma)^2}}.$$

Тут $Q = \frac{1}{\omega_0 CR}$ - еквівалентна добротність амортизатора;

$\gamma = \frac{\omega}{\omega_0}$ - відносна частота системи;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - власна резонансна частота еквівалентної схеми.

Величину, обернену до добротності, називають коефіцієнтом демпфування (β), а величину, обернену до коефіцієнта віброізоляції – коефіцієнтом передачі.

Величина η стає більшою за одиницю, тобто починає зменшуватися амплітуда коливань за рахунок амортизаторів, коли значення $\gamma > \sqrt{2}$ (див. рисунок 7.14). Таким чином, для отримання високих коефіцієнтів віброізоляції доводиться знижувати власну частоту. Однак при цьому виявляється таке протиріччя: при фіксованій вазі РЕА для зменшення ω_0 необхідно знизити жорсткість системи, але знизити цей параметр до потрібних меж не завжди вдається, оскільки це призводить до зменшення допустимого навантаження на один амортизатор, який при перевищенні допустимої ваги, недопустимо стискається (або розтягується) і взагалі втрачає пружність. Тому, як показує досвід розробки РЕА, не вдається досягнути прийнятними технічними методами частоти f_0 , меншої, ніж 5 Гц – 10 Гц .[5].

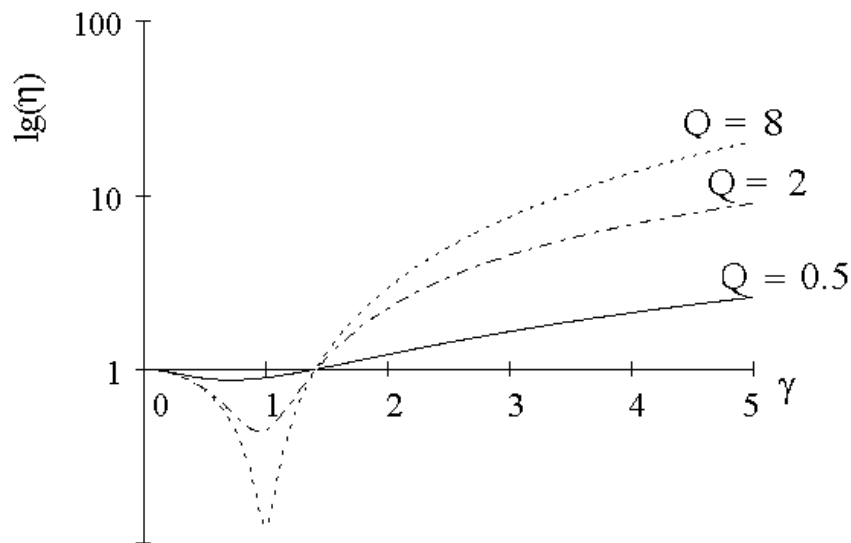


Рисунок 7.14. Залежність коефіцієнта віброізоляції від добротності і відносної частоти

Власна резонансна частота пов'язана зі статичним прогином амортизатора (що виникає під дією власної ваги апаратури) виразом:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{10}{z_{cm}}}.$$

Для зменшення ω_0 амортизатори треба вибирати так, щоб вони були максимально навантажені, тобто, щоб їхній статичний прогин був максимальним. Крім того, слід мати на увазі, що для $\gamma > \sqrt{2}$ коефіцієнт віброізоляції монотонно зростає із ростом добротності Q , отже, для підвищення η при частотах зовнішніх впливів, що суттєво перевищують власну частоту, добротність необхідно збільшувати. При великій добротності отримуємо наближений вираз для обчислення коефіцієнта віброізоляції:

$$\eta \approx \gamma^2 - 1.$$

Крім коефіцієнта віброізоляції, для оцінювання ефективності амортизації вводять параметр, який називають ефективністю (коефіцієнтом корисної дії – ККД) віброізоляції:

$$E = \frac{\eta - 1}{\eta} \cdot 100\%.$$

Якщо отримана амортизація не дає можливості забезпечити потрібну віброізоляцію, то застосовують подвійну або потрійну амортизацію, при якій між основою і апаратом вводять проміжну амортизовану платформу, або розробляють спеціальні амортизатори, які дають більший статичний прогин і, відповідно, нижчу резонансну частоту. При впливі на амортизовану механічну систему, в ній, в залежності від розподілу навантаження між амортизаторами, виникають взаємозв'язані коливання. Такі системи мають n ступенів вільності і в даному курсі розглядатися не будуть.

7.6 Захист радіоелектронних апаратів від ударних впливів

Розглянемо удар, що виникає в результаті руху основи, на якій встановлено пружно закріплене тіло.

При цьому вважатимемо, що і тіло, і основа абсолютно жорсткі. Для простої лінійної системи з одним ступенем вільності рівняння руху матиме вигляд:

$$m\delta'' + F(\delta', \delta) = -m u'', \quad (7.38)$$

де m — маса тіла; $\delta = x - u$ — прогин пружної системи; $F(\delta', \delta)$ — сила пружності і опору, прикладені до тіла; u — абсолютне переміщення основи.

Спочатку система знаходиться в стані спокою ($\delta' = u' = 0$) і рівноваги ($\delta = u = 0$). Зовнішній удар примушує основу переміщатися. Відповідний рух системи може бути виражений через прискорення основи u'' . Тоді з рівняння (7.38) можна визначити максимальні величини δ і $F(\delta', \delta)$ та порівняти їх

значення з допустимими переміщенням і силою. Диференціальне рівняння руху системи з одним ступенем вільності без сили опору має вигляд

$$m\delta'' + F(\delta) = -mu'' \quad (7.39)$$

де $F(\delta)$ — пружна сила амортизатора, яка виникає в результаті прогину δ , який має позитивне значення при розтягуванні.

Характер впливу миттєвої зміни швидкості u'_m на пружну систему у початковий момент часу $t = 0$ залежить від вибору початкових умов.

У момент максимального прогину $\delta = \delta_m$ значення швидкості переміщення $\delta' = 0$, тоді отримаємо:

$$\int_0^{\delta} F(\delta) d\delta = \frac{mu_m'^2}{2}. \quad (7.40)$$

Права частина рівняння (7.40) відповідає кінетичній енергії системи, а інтеграл у лівій частині — роботі системи амортизації, яка дорівнює пружній потенціальній енергії, накопиченій в амортизаторі за відсутності демпфування.

У деяких випадках за допомогою рівняння (7.40) можна знаходити такі важливі параметри системи амортизації, як:

1) максимальний прогин амортизатора δ_m при ударі;

2) максимальна сила $F_m = F(\delta_m) = mx_m''$, де x_m'' — максимальне абсолютне прискорення тіла;

3) зміна швидкості, яка відповідає цьому прискоренню.

Зазвичай необхідно, аби максимальні переміщення чи прискорення тіла, які виникають у результаті удару, не перевищували допустимих значень переміщення $\delta_{\text{дон}}$ або прискорення $x_{\text{дон}}''$, тобто $\delta_m \leq \delta_{\text{дон}}$, $x_m'' \leq x_{\text{дон}}''$.

Для додатних імпульсів $u'' > 0$, які мають одне максимальне значення і певну тривалість, важливими є три основні характеристики:

- максимальне прискорення u_m'' ,
- тривалість τ ;
- зміна швидкості u' .

Для довільного імпульсу (рисунок 7.15) залежність між прискоренням, тривалістю і величиною зміни швидкості можна описати у вигляді

$$u' = \int_0^{\tau} u'' dt,$$

де величина інтеграла відповідає площі заштрихованої області.

Прямокутний імпульс, еквівалентний довільному ударному імпульсу, характеризується однаковим з ним максимальним прискоренням і однаковою величиною швидкості. На рис. 7.15 горизонтальна і вертикальна пунктирні лінії

окреслюють еквівалентний прямокутний імпульс, який відповідає заштрихованому імпульсу.

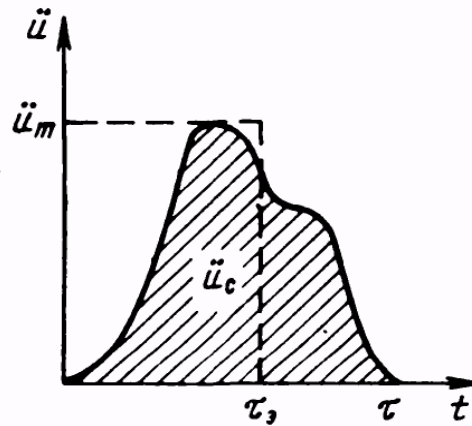


Рисунок 7.15. Ударний імпульс довільної форми

Ефективна тривалість прямокутного імпульсу дорівнює:

$$\tau_e = \frac{1}{u''_m} \int_0^{\tau} u'' dt.$$

Інша постановка задачі на удар може бути розглянута, якщо прийняти, що удар в системі виникає в результаті вільного падіння амортизованої системи на жорстку поверхню. Таке завдання, зазвичай, виникає при розрахунку амортизації упаковки.

При падінні тіла на жорстку поверхню відбувається різка зміна його швидкості у момент дотику до поверхні, після чого тіло, переходить у стан спокою.

Для зменшення впливу на РЕА механічних ударів, як і для захисту від вібрацій, використовують амортизацію [5]. Механізм ослаблення ударних впливів можна пояснити таким чином. Удар є короткочасним відхиленням основи, на якій встановлено РЕА від положення рівноваги і, на відміну від вібрацій, — це широкосмуговий вплив (при трактуванні його в частотній області, тоді в часовій області — це короткотривалий імпульсний вплив). Чим “коротший” удар, тим ширша смуга, в якій лежать частотні складові збурення.

Позначимо частотну смугу (спектр) удару $(0, F_y)$, або $\Delta F_y \approx 1/\tau_{imn}$, де τ_{imn} — “тривалість” удару. Тоді амортизовану механічну систему при малих добротностях слід трактувати як вузькосмуговий фільтр з смугою пропускання $\Delta F_\phi \approx \sqrt{2} f_0$, який має амплітудно-частотну характеристику $1/\eta$.

Якщо смуга пропускання механічної ланки значно менша за ширину смуги удару, то, відповідно, меншою буде і енергія збурення, що діє безпосередньо на РЕА. У першому наближенні ефективність подавлення енергії удару визначаємо за формулою: $\frac{\Delta F_y}{\Delta F_\phi}$. Таким чином, чим більшим є співвідношення смуг, тим ефективнішою є амортизація. Аналогічні співвідношення характерні і для систем з високою добротністю.

Для коротких ударів $\omega_0 \tau_{imn} \ll 1$ максимальне прискорення апаратури :

$$a_{\max} \cong 2a_{o\text{cp}}\omega_0\tau_{imn},$$

де a_o — прискорення основи,

$$a_{o\text{cp}} = \frac{1}{\tau} \int_0^\infty a_o(t) dt \text{ -середнє прискорення основи.}$$

При фіксованій тривалості ударного імпульсу і середньому прискоренні основи a_{\max} буде тим меншим, чим нижча ω_0 — власна частота механічної системи.

Для практичних розрахунків ефективності амортизації ударів вводять коефіцієнт амортизації ударів ν :

$$\nu = \frac{a_{o\max}}{a_{\max}}.$$

Очевидно, що цей коефіцієнт залежить від закону зміни прискорення основи в часі. Найпростіше проаналізувати і розрахувати вплив характеристик амортизованої механічної системи на ефективність подавлення механічних ударів для прямокутних ударних впливів (рисунок 7.16). Їх легко можна моделювати на випробувальних стендах для радіоапаратури. В цьому випадку прискорення основи змінюється в часі за законом

$$a_{o\text{сн}}(t) = \begin{cases} a_{o\text{сн}}, & 0 < t < \tau_{imn}; \\ 0, & t \leq 0, \quad t \geq \tau_{imn}. \end{cases}$$

У цьому випадку реакція високودобротної механічної системи другого порядку на прямокутний імпульс збурення протягом часу його дії описується виразом:

$$a(t) = 4a_{o\max} \cdot \sin^2\left(\frac{\omega_0 t}{2}\right).$$

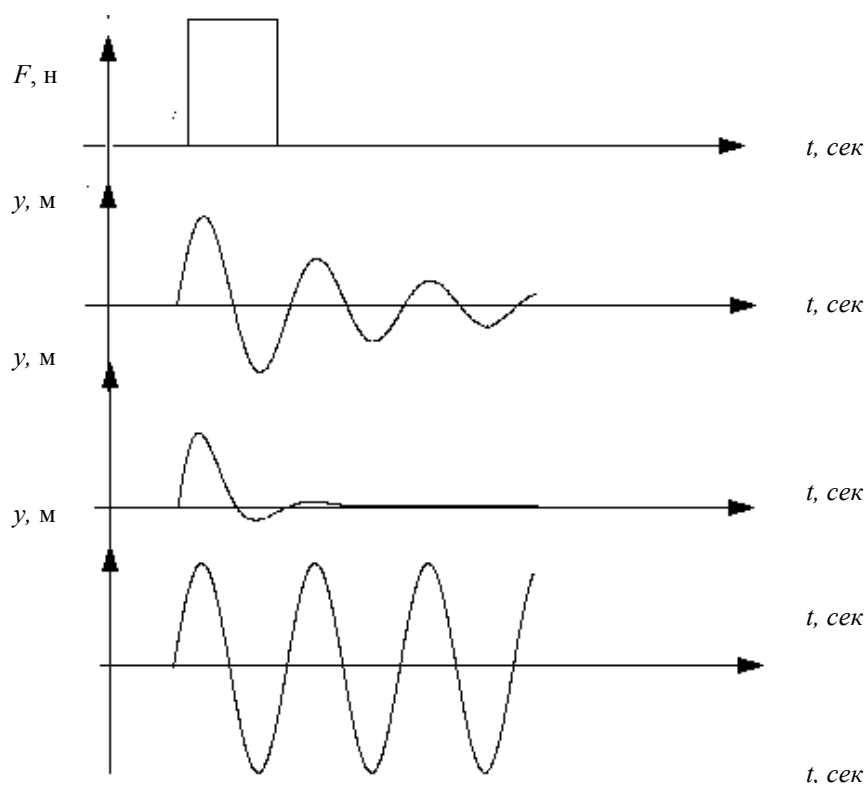


Рисунок 7.16 Типові відгуки системи другого порядку на прямокутні збурення.

На рис. 7.17 показано графік цієї залежності, з якого випливає, що амортизація ефективна лише при $\omega_0 t < 1$.

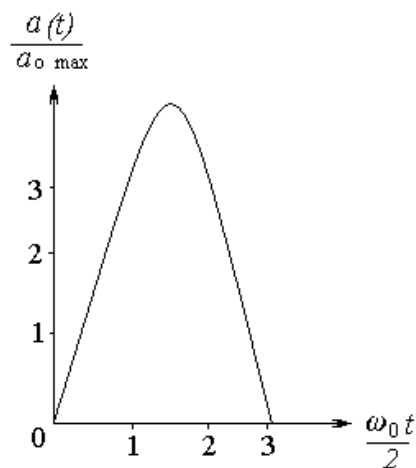


Рисунок 7.17 Залежність прискорення РЕА від часу при прямокутному імпульсі прискорення основи

Якщо ця нерівність не виконується, то амортизація не зменшує прискорення РЕА, а збільшує його. Тобто, амортизація при ударах ефективна лише при виконанні умови $\omega_0 < \frac{1}{\tau_{imn}}$, коли ударний імпульс не встигає

“розкачати” інерційну систему, або $\tau_{imn} < T_0 = 2\pi/\omega_0$. Після припинення удару у цьому випадку:

$$a_{\max} = 2a_{o \max} \sin\left(\omega_0 \tau_{imn} / 2\right).$$

Ця формула кладеться в основу методики розрахунку ефективності подавлення ударів при прямокутному імпульсі прискорення.

Якщо задатися потрібним значенням частоти $\nu \equiv \nu_d$, то з останньої формули матимемо

$$\sin\left(\omega_0 \tau_{imn} / 2\right) < 1/2\nu_d,$$

або

$$f_0 \leq \left(1/\pi\tau_{imn}\right) \arcsin\left(1/2\nu_d\right).$$

У довідниках подаються формули й для інших форм ударних впливів. Зауважимо, що вимоги до захисту від ударів не співпадають з вимогами до захисту від вібрацій — для останнього потрібно зменшувати власні резонансні частоти конструкцій (збільшувати масу), а це суперечить вимогам захисту від ударів. Одним з методів подолання цієї суперечності є підбір матеріалів — створення ударостійких конструкцій шляхом використання прокату тонкостінної сталі, алюмінію, органічного скла, пластичних смол і т.п., що зменшує масу і покращує захист від ударів, але є й добрим захистом від вібрацій завдяки пластичності матеріалу. Деколи можна підібрати матеріали для конструкції використовуючи методи математичного програмування, і складаючи відповідні задачі знаходження екстремуму функції (яка є критерієм рішення про вибір матеріалів) при обмеженнях (на масу, габарити, вартість конструкції). В основу побудови критерію можна покласти відповідні коефіцієнти ефективності. Загалом ці задачі є складними і на практиці використовують експериментально розрахункові методи.

Конструкції деяких амортизаторів показано на рисунку 7.18.

При розрахунку на удар для вибору амортизаторів, як правило, задають вагу апаратури, прискорення ударного імпульсу, тривалість ударного імпульсу, максимальну допустиму величину прискорення для апаратури.

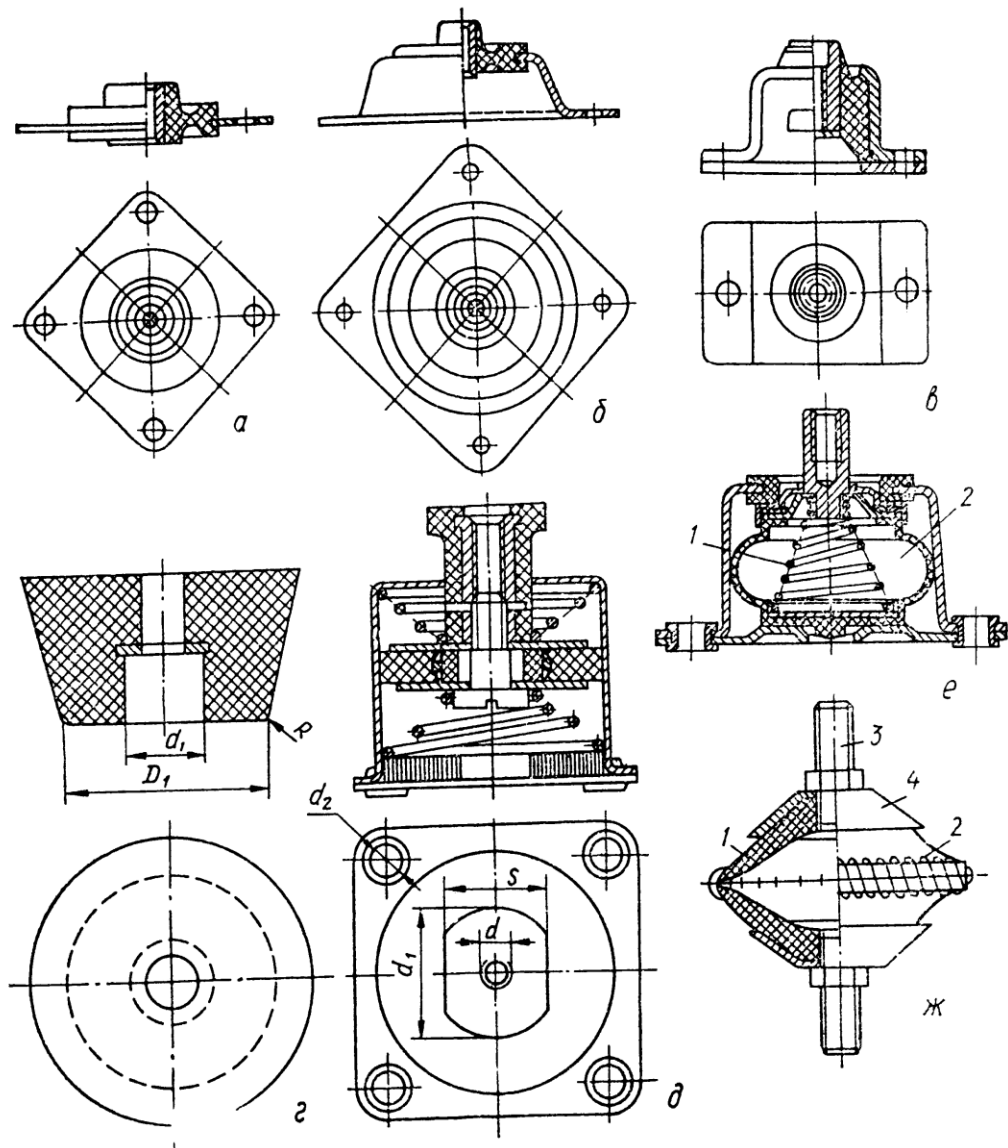


Рисунок 7.18 Конструкції амортизаторів

а – амортизатори плоскі (АП); б – амортизатори чашечні (АЧ);

в – амортизатори корабельні зі страховкою (АКСС); г – амортизатори опорні (АО); д – метало-пружинні амортизатори просторового навантаження (АПН); е – амортизатори рівно частотного демпфування (АД) (1 – спіральна пружина; 2 – повітряна камера); ж – цільнометалевий амортизатор (1 – демпфуючі елементи; 2 – металевий дріт; 3 – кріпильні болти; 4 – обмежуючі шайби).

Лекція 8

Забезпечення теплових режимів в БМА. Джерела тепла в БМА. Термостійкість радіодеталей. Моделі теплообміну в БМА. Види теплопередачі в БМА. Розрахунки теплових режимів БМА з герметичним та перфорованим корпусом

8.1 Джерела тепла в біомедичній апаратурі

Радіoeлектронна апаратура, в тому числі медичного призначення, може експлуатуватися в наземних умовах (в приміщеннях, на відкритому повітрі, в кузовах і кабінах транспортних засобів), на кораблях та інших плаваючих засобах, а також на літаках, ракетах, супутниках.

Наземна апаратура повинна зберігати працездатність у діапазоні температур від -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

Апаратура для літаючих засобів працює в широкому діапазоні оточуючого середовища (від -70°C до $+100^{\circ}\text{C}$, а іноді і до $+200^{\circ}\text{C}$) і може потрапляти під вплив різких змін температури (термоударів). Однією з основних вимог, які висуваються до неї є захист від нагрівання з боку обшивки літаючого апарату.

Корабельна радіoeлектронна апаратура може експлуатуватися у вологому повітрі, температура якого коливається від -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

Джерелами тепла в радіoeлектронному апараті є різні електричні пристрої та окремі радіодеталі. Електрична енергія, яку споживають радіодеталі, перетворюється в них у різні форми енергії: електромагнітну, механічну і безпосередньо в теплову. Більшість радіoeлектронних пристроїв споживає від джерел живлення потужність, яка вимірюється десятками, а іноді сотнями ват, при цьому корисна потужність може вимірюватися від десятих частин до одиниць ват. Решта електричної енергії перетворюється в теплову, виділяючись всередину апарату. Температура нагріву апарату виявляється вищою, ніж температура оточуючого середовища. У результаті відбувається процес віддачі теплоти в оточуючий простір. Інтенсивність цього процесу залежить від різниці температур апарату і навколишнього середовища. При певному значенні температури кількість теплоти, яку виділяє апарат, дорівнює кількості теплоти, яку він віддає в оточуюче середовище, при цьому апарат перебуває в стані теплової рівноваги, температура нагрівання в кожній його точці стабілізується. Значення температури, при якій відбувається тепла рівновага, визначається кількістю теплоти, виділеною всередині апарату, інтенсивністю процесу тепловіддачі в оточуючий простір та температурою оточуючого середовища.

Ефективність роботи радіoeлектронного апарату визначається надійністю його елементів, яка значною мірою залежить від температури середовища, що оточує елемент. Для кожного типу елемента в технічних умовах вказано допустиму температуру, перевищення якої може призвести до виходу з ладу як окремого елемента, так і апарату в цілому. Тому однією з найважливіших задач

конструктора радіоелектронної апаратури є забезпечення належних теплових режимів для кожного елемента.

8.2 Термостійкість радіодеталей

Елементи і механічні частини конструкції ЕА нормально функціонують лише в обмеженому температурному діапазоні, тобто мають обмежену термостійкість.

Під термостійкістю (теплостійкістю, нагрівостійкістю, морозостійкістю) будемо розуміти здатність матеріалів та елементів витримувати протягом короткого або тривалого часу вплив високих, низьких температур, а також різкі зміни температури (температурні удари) [5].

Термостійкість матеріалів, елементів визначають, як правило, за появою суттєвих змін їхніх властивостей або параметрів, зумовлених різними фізико-хімічними процесами. Величину термостійкості оцінюють діапазоном температур, у межах яких відбуваються ці зміни.

Наприклад, термостійкість p — n переходу в транзисторі обмежена при високих температурах власною провідністю в кристалі напівпровідника, а також явищем кумулятивного розігрівання. При появі власної провідності p — n переходу перестають існувати, і транзистор втрачає здатність виконувати свої функції. Явище кумулятивного розігрівання полягає в наступному: при високих температурах зворотний струм p — n переходу стає настільки великим, що внутрішнє тепловиділення за рахунок цього струму ще більше збільшує температуру, транзистор втрачає стійкість і відбувається необоротний пробій p — n -переходу. Термостійкість транзистора обмежена меншою з температур, яка викликає власну провідність або приводять до явища пробою. При від'ємних температурах порушення термостійкості транзистора може супроводитися механічними пошкодженнями через різні температурні деформації окремих частин приладу, а також зменшенням коефіцієнта підсилення по струму.

З термостійкістю пов'язано інше важливе поняття: допустимі температури для матеріалів і елементів. Тому для кожного типу радіодеталей існує найбільш вразливе в тепловому відношенні місце і допустима температура цього місця, наприклад, у напівпровідникових приладах це p — n переходи, певні області анодів, катодів і балонів для електронних ламп, центральні області обмоток трансформаторів і так далі.

Сукупність температур всіх елементів, з яких зібраний радіоелектронний апарат, тобто його температурне поле, характеризує тепловий режим апарату. Всі елементи, з яких складається апарат, повинні працювати в нормальному тепловому режимі. Тепловий режим окремого елемента вважається за нормальний; якщо виконуються дві умови: 1) температура елемента в умовах експлуатації перебуває в межах, що обмежують діапазон температур, допустимих для даного елемента; 2) температура елемента така, що буде забезпечена його робота із заданою надійністю (друга умова більш загальна). Виконання другої умови для конкретного елемента може бути пов'язане з

необхідністю забезпечення заданих кількісних характеристик його надійності, постійності температури в часі, стійкості роботи схеми і тому подібне Тепловий режим апарату вважається за нормальний, якщо для всіх елементів, змонтованих в апараті, виконуються сформульовані вище умови.

Якщо перша умова, що визначає поняття «Нормальний тепловий режим», застосовна до апаратури різного функціонального призначення, то другу умову необхідно формулювати для кожного виду апаратури, підкреслюючи особливості режиму її роботи.

Забезпечення нормального теплового режиму є одному з головних завдань, що вирішуються при проектуванні апаратури. Для вирішення цього завдання приймається ряд мір: вибирають певні типи елементів залежно від умов експлуатації апаратури; зменшують потужності розсіювання елементів; вводять в апаратуру спеціальні нагрівачі, що розігрівають її при від'ємних температурах середовища; застосовують раціональне розміщення елементів, вузлів і блоків; вибирають форму і розміри окремих конструктивних складових, термостатують вузли і блоки, нарешті, застосовують спеціальні засоби охолодження окремих елементів і апаратури в цілому. Як правило, заходи, вживані для забезпечення нормального теплового режиму елементів і апаратури, приводять до збільшення габаритних розмірів, необхідності установки додаткового устаткування, перевитрати електроенергії, збільшення ваги і ускладнення конструкції. Тому дуже важливо технічно грамотно обґрунтувати вживані заходи. Конструктор повинен знайти оптимальне рішення, компромісне між необхідністю забезпечити нормальний тепловий режим елементів і неприпустимістю збільшення споживання енергії, ваги, габаритів і так далі Обґрунтування мір по охолодженню апаратури може бути отримане шляхом розрахунку її теплових режимів або експериментування на теплових і ЕАльних макетах ЕА.

8.3 Моделі теплообміну в БМА

Більшість модулів ЕА другого структурного рівня і вище – це складна система тіл з багатьма внутрішніми джерелами теплоти. Зробити точний аналітичний опис температурних полів всередині блоку є громіздкою задачею, розв'язати яку практично неможливо через неточність вихідних даних: потужності джерел теплоти, теплофізичних властивостей матеріалів, розмірів нагрітої зони. Тому при розрахунку теплових режимів блоків ЕА доцільно використовувати наближені методи аналізу і розрахунку. Важливу роль відіграють математичні та фізичні моделі теплообміну. При цьому часто звертаються до аналогів, використовують подібність інших явищ до теплових.

Просторові (розподілені у просторі) явища описуються функціями багатьох змінних і називаються *полями*. Математична фізика використовує для опису полів диференціальні рівняння в частинних похідних, які складаються з врахуванням нерозривності поля у просторі та неперервності у часі, збереження в елементарних об'ємах середовища речовини та енергії, геометричної конфігурації поля, лінійності, на основі постулатів та законів

фізики. Щоб виокремити ЕАльний вигляд поля необхідно задати умови — початкові і граничні (крайові). Задачу представляють диференціальним рівнянням разом з крайовими умовами. Для багатьох практичних задач задання умов спрощують, вважаючи поверхні циліндрами, сферами, площинами, часом з нескінченними деякими розмірами, а середовища однорідними, стаціонарними (такими, що їх властивості з часом не змінюються). Не завжди розв’язок рівняння вдається подати за допомогою формули. Обминути таку трудність можна застосовуючи аналогове моделювання, тобто експериментальним шляхом шукати значення величини, яка моделює температуру у дослідженій області простору.

Існує аналогія між протіканням струму в провіднику і перенесенням тепла. Аналогами в цьому випадку є різниця потенціалів і різниця температур, електричний струм і тепловий потік, електричний опір і тепловий опір. Ця обставина дає можливість аналізувати процеси теплообміну, використовуючи добре відомі методи аналізу розгалужених електричних кіл. Моделювати розподіл температури (скалярної величини) можна розподілом електричних потенціалів.

8.3.1 Стаціонарне температурне поле

При моделюванні одержимо такі ж результати, як і при роботі з натурою. Хоча теоретичної переваги не дає жодна з моделей, практичну перевагу має електричне поле — його легше фіксувати (вимірювати), моделювання має значну швидкодію.

Розглянемо “плоске” поле температур T і “плоске” поле потенціалів u . Якщо вважати, що зміни температури з часом незначні (поле тоді називають стаціонарним) то матимемо рівняння для температур:

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = 0$$

і для потенціалів:

$$\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y^2} = 0.$$

Ці рівняння (рівняння Лапласа) описують стаціонарне плоске поле.

Нехай, необхідно дослідити розподіл температури у деякій заданій області (полі температур).

Нехай відома межа L області та відповідні умови на межі — температура і швидкість її зміни у заданому характерному напрямі (як правило, це нормаль до межі). Для моделі це — напруга і швидкість її зміни:

$$T|_{L_1} = T_0 \Phi(x, y); \quad u|_{L_1} = u_{0M} \Phi(x_M, y_M)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{L_2} = 0; \quad \left. \frac{\partial u_M}{\partial n} \right|_{L_2} = 0.$$

Очевидно, що у цьому випадку, маємо ізольовану область, у якій відсутній потік температури (струму — для моделі).

Тому розв'язком задачі є лінії однакових температур (потенціалів) — ізотерми (рис.8.1).

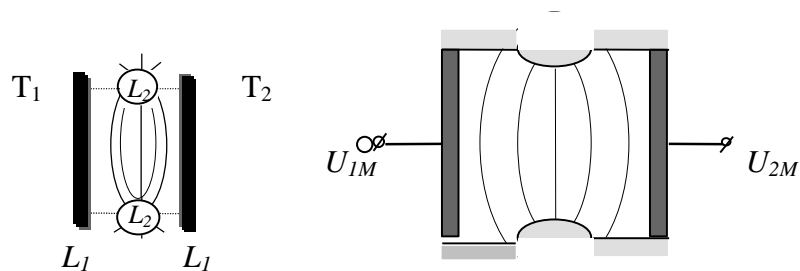


Рисунок 8.1 Вигляд ліній з однаковою температурою та потенціалом

Константи подібності матимуть вигляд:

$$\frac{u_M}{T} = N_T; \quad \frac{x_M}{x} = N_x; \quad \frac{y_M}{y} = N_y.$$

Відповідно до цього отримаємо:

$$\frac{N_T}{N_{x^2}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{N_T}{N_{y^2}} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0,$$

звідки $\frac{N_T}{N_{x^2}} = \frac{N_T}{N_{y^2}}$. Задаємось N_T , а $N_x = \pm N_y = N$ — зберігаємо в

натуральних розмірах. Граничні умови теж повинні бути геометрично подібними. Оскільки критерії подібності відсутні, то має місце автомодельність. При врахуванні теплоємності, автомодельність втрачається.

8.3.2 Нестационарне температурне поле

Нестационарна теплопередача описується рівнянням, виведення якого базується на гіпотезі Фур'є про однаковість просторових та часових параметрів потоку температури:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = CR \frac{\partial T}{\partial t}, \text{ [град. / м}^2\text{] = [град./ с].}$$

Для забезпечення розмірності вводять розмірні величини з фізичним змістом: C — питома теплоємність, R — тепловий опір, t — час.

Електричною моделлю цього рівняння є “конденсаторний шар” (рис. 4.2). На рисунку ємність конденсатора моделює теплоємність. Опір верхньої області є моделлю теплового опору. Рівняння такої моделі має вигляд:

$$\frac{\partial^2 u_M}{\partial x_M^2} + \frac{\partial^2 u_M}{\partial y_M^2} = C_{0M} R_{0M} \frac{\partial u_M}{\partial t_M}.$$

Оскільки, як правило, $RC \gg R_M C_M$, то іноді навіть будують спеціально розподілені конденсаторні шари (використовують металеву сітку), щоб зрівняти масштаби моделювання.

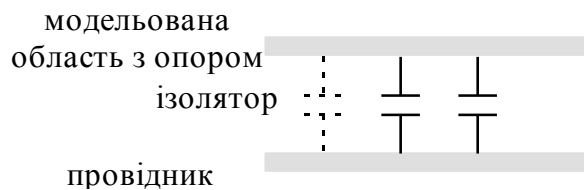


Рисунок 8.2 Конденсаторний шар — електрична модель температурного поля

Для запису таких задач часто використовують позначення векторного аналізу. Зокрема, розглядають температурне поле (кажуть, що в просторі задано поле температур, якщо в кожній точці простору або деякої його області визначено значення температури). Поле може бути скалярним або векторним, залежно від характеру дослідженої величини.

Тобто, якщо T — скалярне поле, то для позначень $\nabla \equiv grad \equiv \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k$, ∇T — вектор, який називають градієнтом температури. Тоді задача розподілу тепла може виглядати наступним чином:

Якщо:

а) $T = \mu_1(x)$, $x \in \Gamma$, то задано температуру на границі, а задача називається задачею Діріхле;

б) $\frac{\partial T}{\partial n} = \mu_2(x)$, $x \in \Gamma$, то задано тепловий потік, задача Неймана;

$$\text{в) } \frac{\partial T}{\partial n} + \sigma(T - \mu_3(x)) = 0, \quad x \in \Gamma, \text{ то теплообмін за Ньютоном, де}$$

$\mu_3(x)$ — температура зовнішнього середовища.

8.4 Способи передачі теплової енергії: теплопровідність, конвекція, радіація

8.4.1 Теплопровідність

Перенесення тепла від нагрітих тіл до холодних здійснюється теплопровідністю, тепловим випромінюванням і тепловою конвекцією [5].

Процес передачі тепла **теплопровідністю** є характерним для твердих тіл і пояснюється обміном кінетичною енергією на атомно-молекулярному рівні. Це відбувається або тоді, коли температура в різних точках тіла різна і (або), якщо контактують тіла з різним ступенем нагріву. Цей процес визначається законом Фур'є і кількісне значення перенесеного теплового потоку P_T виражається залежністю:

$$P_T = \frac{\lambda}{l_T} (T_1 - T_2) S_T$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу; l_T - довжина шляху теплового потоку; S_T - площа теплообміну; T_1, T_2 - відповідно абсолютні температури нагрітої і холодної областей тіла.

8.4.2 Теплове випромінювання – це передача теплової енергії у вигляді електромагнітних коливань від випромінюючого до поглинаючого тіла, тобто, від середовища з вищою температурою до середовища з нижчою температурою. Теплопередача випромінюванням P_B визначається законом Стефана-Больцмана і в загальному вигляді описується співвідношенням:

$$P_B = \alpha_B (T_1 - T_2) S_B$$

де α_B - коефіцієнт теплопередачі випромінюванням; T_1, T_2 - температури випромінюючої та поглинаючої поверхонь (середовища); S_B - площа випромінюючої поверхні.

Коефіцієнт теплопередачі випромінюванням для найпростішого випадку можна знайти з виразу:

$$\alpha_B = c_0 \varepsilon \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}$$

де $c_0 = 5,673 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; ε – ступінь чорноти випромінюючої поверхні.

Підставивши його у попереднє співвідношення, отримуємо вираз:

$$P_B = c_0 \varepsilon \left(\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right) S_B$$

8.4.3 Теплопередача конвекцією має місце у газоподібному середовищі або рідині, які дотикаються до нагрітих чи охолоджених поверхонь і визначається законом Ньютона-Ріхмана:

$$P_K = \alpha_K (T_1 - T_2) S_K$$

де α_K – коефіцієнт теплопередачі конвекцією; T_1, T_2 – температури поверхні тіла та оточуючого середовища; S_K – площа теплопровідної поверхні.

Розрізняють конвекцію вільну (природну) і примусову. Вільна конвекція має місце при нагріванні частинок середовища, які знаходяться в безпосередньому контакті з нагрітим тілом. Нагрівання частинок середовища супроводжується їх природним переміщенням вгору, пов'язаним із зміною густини середовища, і заміною холоднішими частинками, в результаті чого відбувається безперервне перемішування середовища.

Примусова конвекція відбувається за рахунок примусового перемішування частинок середовища.

Для випадку природної конвекції коефіцієнт теплопередачі може бути поданий у вигляді функції, що залежить від ряду параметрів

$$\alpha_K = f(T_1, T_2, \beta, \lambda, c, \nu, a, g, \Phi),$$

де β – коефіцієнт об'ємного розширення середовища, $1/\text{К}$; λ – коефіцієнт теплопровідності середовища, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$; c – питома теплоємність середовища, $\text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості середовища, $\text{м}^2/\text{с}$; a – коефіцієнт температуропровідності рідини або газу, $\text{м}^2/\text{с}$; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; Φ – комплексний коефіцієнт, який залежить від геометричних розмірів тіла, що охолоджується і стану його поверхні.

Примусова конвекція охолоджуючих газів або рідин може проходити в ламінарному, перехідному або турбулентному режимах. Останній режим є найінтенсивнішим за теплообміном і тому йому надають перевагу при конструюванні систем охолодження ЕА.

8.4.4 Узагальнений вигляд рівнянь теплообміну

Всі рівняння теплообміну можна представити в узагальненому вигляді

$$P = \frac{1}{F}(T_1 - T_2)$$

де F – тепловий коефіцієнт; T_1, T_2 – температура двох ізотермічних поверхонь, між якими відбувається обмін тепловою енергією, або температура тіла і оточуючого середовища. Якщо між цими поверхнями відсутні стоки і додаткові джерела теплової енергії, то тепловий коефіцієнт набуває змісту теплового опору R_T , а величина, обернена до нього – теплової провідності σ_T .

Для процесів переносу тепла ці величини описуються виразами:

$$\text{теплопровідність} - R_T = \frac{l_T}{\lambda S_T}; \quad \sigma_T = \frac{\lambda S_T}{l_T};$$

$$\text{випромінювання} - R_B = \frac{1}{\alpha_B S_B}; \quad \sigma_B = \alpha_B S_B;$$

$$\text{конвекція} - R_K = \frac{1}{\alpha_K S_K}; \quad \sigma_K = \alpha_K S_K.$$

Система рівнянь теплового балансу для системи, що складається з N тіл, в кожному з яких діє джерело тепла потужністю P_j , записується у вигляді:

$$P_j = \sum_{i=1}^{N+1} \sigma_{ij}(T_i - T_j),$$

де σ_{ij} – теплові провідності від тіла i до тіла j або до середовища; T_i, T_j – температури i і j -го тіла; оточуюче середовище враховується як $(N+1)$ -ше тіло.

Якщо потужність джерел тепла, коефіцієнти теплопровідності окремих частин системи і її коефіцієнти теплообміну не залежать від температури, то в будь-якій j -й точці системи стаціонарна температура

залежить від потужності джерел (з врахуванням принципу суперпозиції температурних полів) таким чином:

$$T_j = T_c + \sum_{i=1}^N F_{ij} P_i,$$

де T_j – температура j -го тіла; T_c – температура зовнішнього середовища; P_i – потужність джерел в i -тій частині системи; N – число областей, з яких складається система; F_{ij} – теплові коефіцієнти, які не залежать ні від температури зовнішнього середовища, ні від величини потужності джерел.

В загальному випадку теплові коефіцієнти залежать від коефіцієнтів теплообміну і теплопровідності, а останні змінюються із зміною температури; те ж саме стосується і теплопровідності σ_{ij} , внаслідок чого система є нелінійною.

8.5 Сучасні методи забезпечення теплового захисту електронної апаратури біомедичного призначення

Електронні апарати (ЕА), в тому числі біомедичні, мають різне функціональне призначення, конструкцію, розміри, компоновку вузлів, системи охолодження; характеризуються різним споживанням енергії, працюють в різних умовах і тому подібне. На даний час, враховуючи їх різноманітність, не представляється можливим запропонувати єдину теорію і метод розрахунку теплових режимів всіх апаратів. Проте зіставлення різних ЕА дозволяє в деяких з них помітити загальні конструктивні особливості і однакові фізичні процеси перенесення тепла.

Істотний вплив на процеси теплообміну в апаратах спричиняє конструкція їх корпусів. Всілякі конструкції корпусів доцільно розділити на герметичні, перфоровані, вентильовані і забезпечені спеціальними теплообмінниками.

У процесі перенесення теплової енергії в ЕА беруть участь всі три механізми теплопередачі. Залежно від конкретних режимів роботи та умов експлуатації відносний вклад кожного з видів теплопередачі може суттєво відрізнятися.

Залежно від характеру контакту теплоносія і джерела тепла розрізняють системи охолодження прямої і непрямої дії. У системах охолодження прямої дії теплоносії безпосередньо омиває поверхні джерел тепла. У системах охолодження побічної дії джерела тепла і поверхні теплообміну розділені різними конструктивними елементами, що виконують роль провідників тепла, так званих теплових мостів.

Окрім того, системи охолодження розділяють на системи загального і локального (місцевого) охолодження. При загальному охолодженні проводиться охолодження всіх елементів апаратури, при локальному —

окремих найбільш навантажених або найменш термостійких радіодеталей і вузлів.

Системи охолодження, які використовуються в ЕА з тривалим часом роботи можна класифікувати ще й за такими параметрами:

- за виглядом теплоносія – повітряні (газові), рідинні, випаровувальні, кондуктивні та комбіновані;

(Повітряними (газовими) називають такі системи охолодження, в яких як теплоносієм використовується повітря. У рідинних системах охолодження теплоносієм є різні рідини, не доведені до кипіння. Випаровувальними називають системи охолодження, в яких використовують киплячі рідини. При кондуктивній системі охолодження відведення тепла від нагрітих частин апаратури здійснюється за рахунок теплопровідності. При цьому нагріті і холодні частини апарату знаходяться в безпосередньому контакті або сполучені спеціальними металевими провідниками.)

- за характером руху теплоносія – з природним або примусовим рухом охолоджуючого середовища.

Повітряні, рідинні, випаровувальні і комбіновані системи охолодження можуть бути спроектовані по розімкненому або замкнутому циклах. У системі, організованій по розімкненому циклу, відпрацьований (нагрітий) теплоносієм видаляють з системи і більше не використовують. У другому випадку нагрітий теплоносієм охолоджується і знов надходить у систему охолодження. Для охолодження теплоносія застосовують теплообмінники.

Системами охолодження з проміжним теплоносієм називають такі системи, в яких тепловий зв'язок між теплоносієм, що омиває джерела тепла, і навколишнім середовищем здійснюється за допомогою додаткового контура, в якому протікає проміжний теплоносієм.

Повітряне охолодження.

Природне повітряне охолодження здійснюється за двома схемами: з герметичним (рис. 8.3, а, в) і перфорованим (рис. 8.3, б, г) корпусом і є найпростішим та надійним способом охолодження, не вимагає затрат додаткової енергії, але забезпечує охолодження лише при невеликих питомих потужностях розсіювання, тобто в ЕА та БМА, які працюють у полегшеному тепловому режимі.

За рахунок раціонального використання перфорації кількість відведеного тепла може бути збільшена приблизно на 30%, а перегрівання всередині блоку зменшене на 20%. Оптимальне співвідношення між сумарною площею перфораційних отворів і зовнішньою поверхнею корпусу лежить в межах 20...30%, оптимальний діаметр отворів 6...12 мм.

Для інтенсифікації теплообміну при природному охолодженні застосовують спеціальні екрани, які спрямовують потоки повітря, нанесення ребер на окремі поверхні, додаткові радіатори.

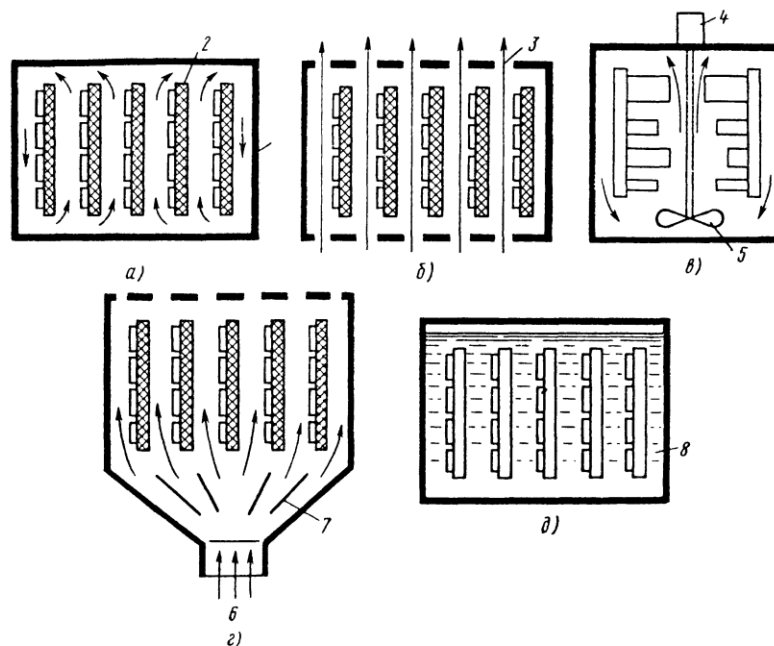
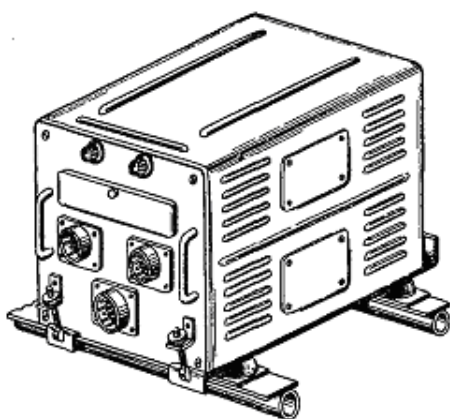


Рисунок 8.3. Системи повітряного охолодження блоків:

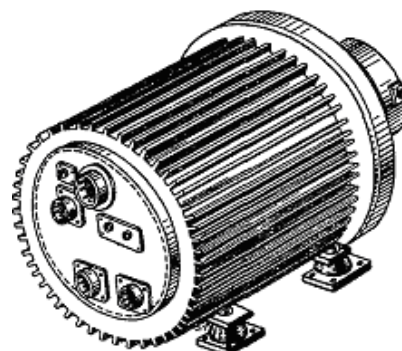
- а – природна циркуляція повітря в кожусі з ущільненням;
- б – природна циркуляція повітря через кожух з перфорацією;
- в – примусова циркуляція повітря в кожусі з ущільненням;
- г – примусова циркуляція повітря через кожух з перфорацією;
- д – рідинне охолодження

(1 – кожух; 2 – плати (шасі) з ЕРЕ; 3 – отвори; 4 – двигун; 5 – вентилятор; 6 – вхід від вентилятора; 7 – відбивачі, що розподіляють повітряний потік рівномірно по поперечному перерізу кожуха; 8 – рідина)

На рисунку 8.4 показано приклади конструктивного оформлення вузлів.



а)



б)

Рисунок 8.4. Приклади конструктивного оформлення вузла: а) у перфорованому корпусі; б) у циліндричному корпусі з ребрами для тепловідведення.

Конструкція ЕА з природним повітряним охолодженням повинна задовольняти ряд вимог:

- забезпечувати хороше обтікання охолоджуючим повітрям всіх елементів конструкції, особливо теплонавантажених;
- теплонавантажені елементи слід розміщувати у верхній частині блоку ближче до стінок;
- теплочутливі елементи необхідно захищати від обтікання нагрітим повітрям;
- при впливі променевої енергії теплочутливі елементи необхідно захищати екранами;
- всі теплонавантажені елементи повинні мати хороші теплові контакти з несучими вузлами (шасі, плати, кожухи і т.п.).

Примусове повітряне охолодження має три різновидності: внутрішнє перемішування, зовнішній обдув і продувку. У першому випадку ЕА розміщують в герметичному корпусі, в другому і третьому – можливе застосування загальних або локальних схем примусової вентиляції.

Примусова вентиляція може відводити до 60...80% тепла, що виділяється в блоці. Конструкція апаратури, в якій застосовують примусове повітряне охолодження повинна задовольняти певним вимогам:

- мати малий аеродинамічний опір охолоджуючому повітрю,
- забезпечувати хороший доступ холодного повітря до теплонавантажених елементів;
- мати захист внутрішнього об'єму від пилу;
- містити елементи, призначені для вирівнювання поля швидкостей потоку охолоджуючого повітря – перфоровані решітки, екрани, патрубки і т.п.;
- здійснювати автоматичне вимкнення живлення ЕА при виході з ладу вентиляції.

Рідинне охолодження.

У системах з природним або примусовим рідинним охолодженням як теплоносії використовуються вода, антифризи (водоспиртові суміші), кремнійорганічні та фторорганічні рідини. Перенесення тепла від нагрітої поверхні до рідини відбувається за рахунок конвекції і теплопровідності (рис. 8.5).

Залежно від режиму роботи ЕА та БМА теплообмін між радіодеталями та рідиною відбувається в умовах природної конвекції або кипіння при природній конвекції. Сприйнята рідиною теплова енергія передається стінкам корпусу.

При рідинному охолодженні відведення тепла від нагрітої рідини може бути здійснене за допомогою змійовика, по якому тече теплоносії, введеного всередину корпусу і зануреного в рідину. У цьому випадку основна кількість тепла, яке виділяється, відводиться теплоносієм, що протікає через змійовик.

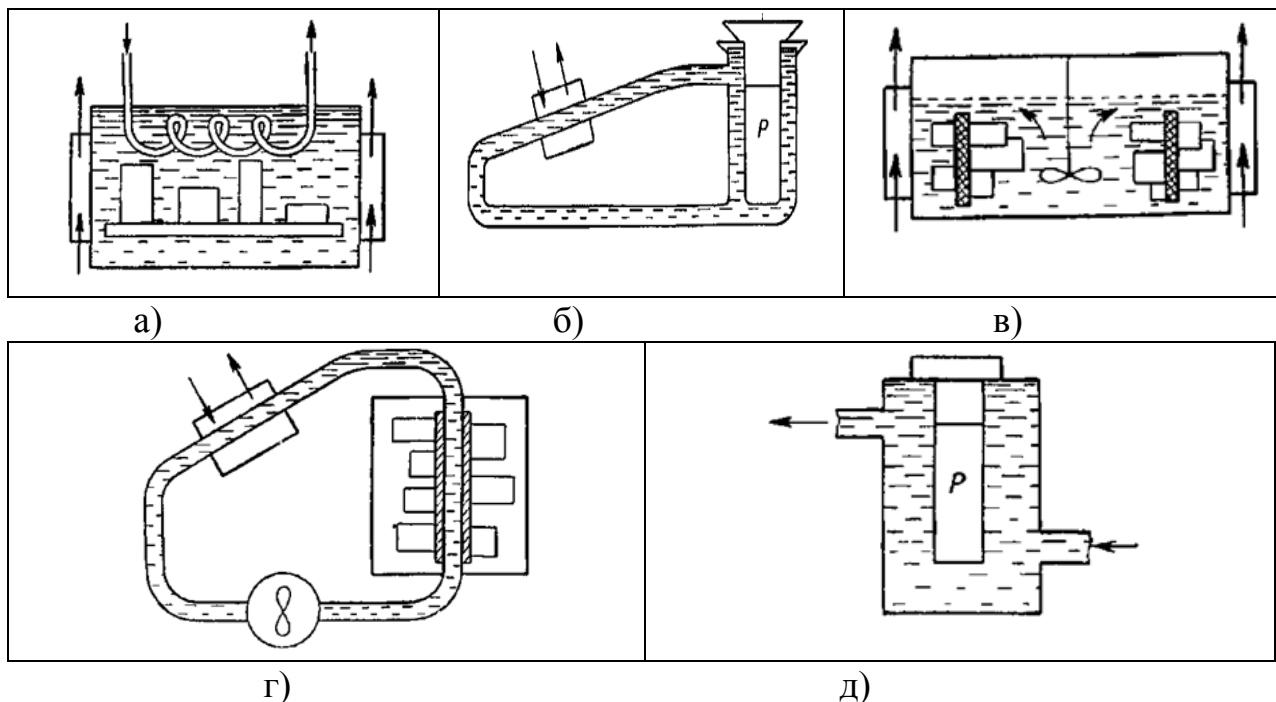


Рисунок 8.5. Рідинне охолодження

Випаровувальне охолодження.

Випаровувальне охолодження також може бути природним або примусовим. В обох випадках відбір потужності здійснюється за рахунок кипіння охолоджуючої рідини на поверхні, яку треба охолодити всередині замкнутого об'єму ЕА (рис. 8.6.).

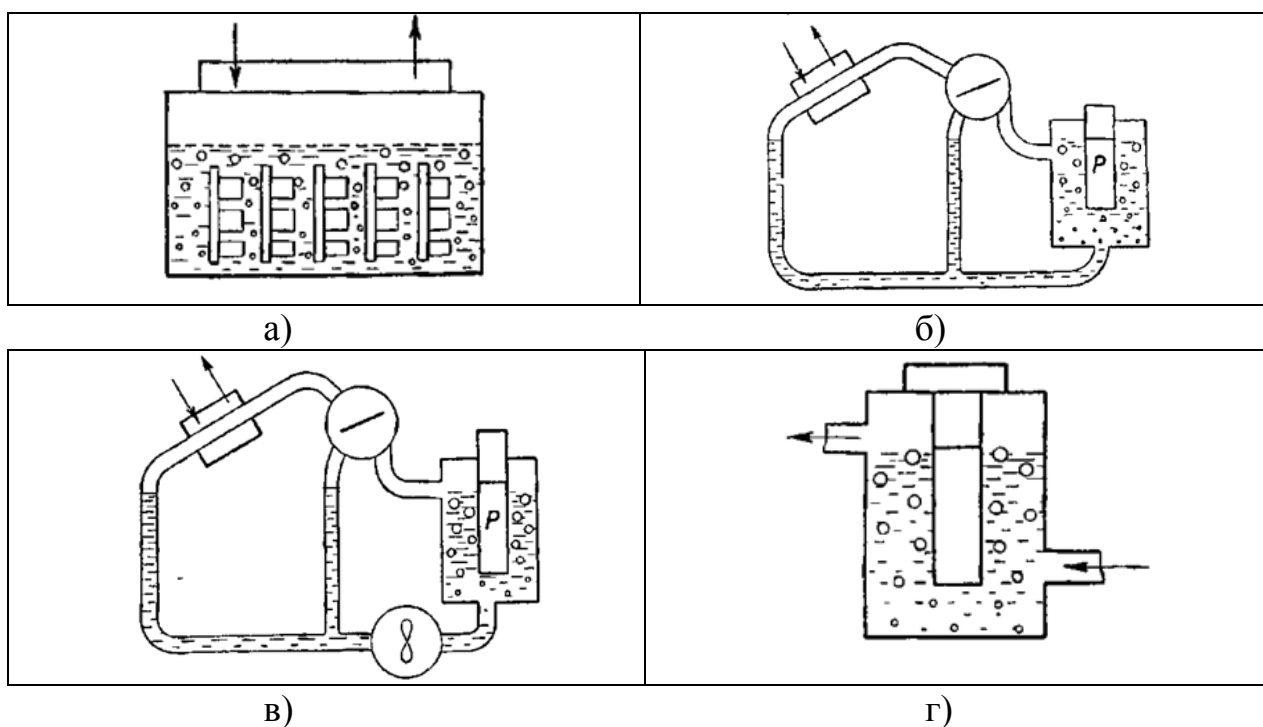


Рисунок 8.6. Випаровувальне охолодження

Найдоцільніше використовувати в таких системах рідини з низькою температурою кипіння. Перенесення тепла від нагрітого тіла і далі в оточуюче

середовище відбувається за рахунок теплоти пароутворення та конденсації пари. Висока ефективність механізму випаровувального охолодження використовується в різновидності радіаторів – теплових трубах.

Рідинні та випаровувальні системи поділяються на такі, що працюють в умовах природного охолодження, термосифонні, з внутрішнім перемішуванням і примусовою циркуляцією рідини. Вони можуть бути прямої та непрямої дії і працювати по замкнутому і розімкнутому циклах.

Охолодження корпусу апарату при рідинному та випаровувальному охолодженні здійснюється за допомогою теплообмінників. Їх конструкції та принцип дії можуть бути різноманітними. При рідинному охолодженні апаратури теплообмінники доцільно розташовувати на бічній поверхні корпусу (рис. 8.5, а, в).

При випаровувальному охолодженні велика частина тепла, що виділяється в радіодеталях, відводиться разом з паром. У цьому випадку теплообмінники розташовуються на кришці корпусу (рис. 8.6, а), пара конденсується на охолодженій поверхні, а конденсат стікає вниз.

Кондуктивне охолодження (рис. 8.7, а – в). При кондуктивному охолодженні елементів, вузлів і блоків апаратури теплова енергія переноситься від джерел тепла до теплоприймачів теплопровідністю і випромінюванням. Кондукція як механізм теплообміну грає певну роль у всіх розглянутих вище системах охолодження. Наприклад, при повітряному охолодженні апаратури теплові потоки від радіодеталей досягають шасі або плат апаратури в значній мірі завдяки кондукції. Кондуктивний механізм теплообміну визначає перепади температур між джерелами тепла і поверхнями охолодження в рідинних і випаровувальних системах охолодження непрямої дії. Проте в цих випадках кондукція не визначає назви систем охолодження, оскільки в них діють ще й інші інтенсивніші механізми теплообміну. У кондуктивних системах охолодження явище кондукції використовується як основний механізм перенесення тепла від джерел до приймачів тепла.

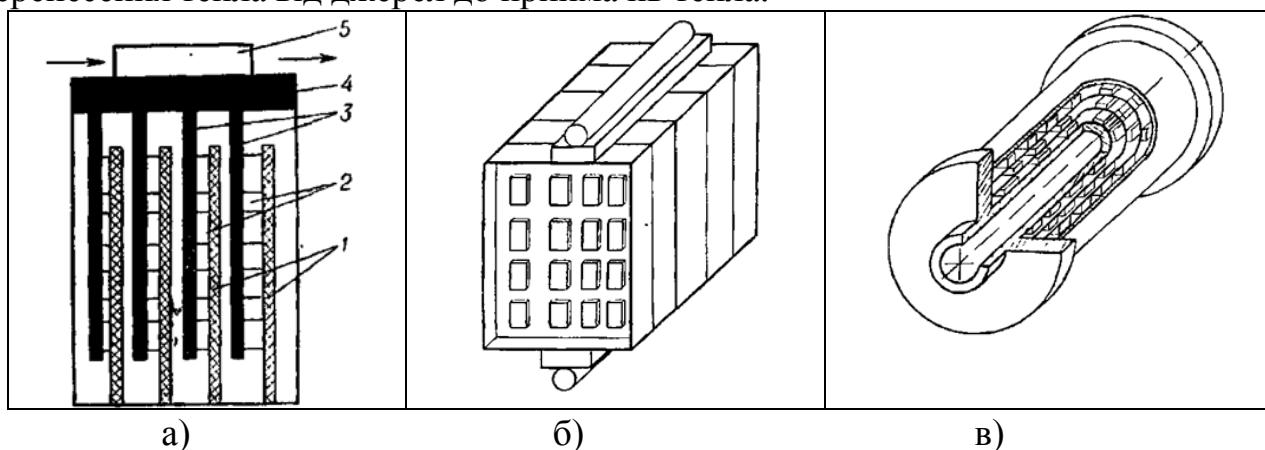


Рисунок 8.7. Кондуктивне охолодження

Принцип кондуктивного охолодження блоку схематично зображений на рис 8.7, а. Тут плати 1, на яких змонтовані мікросхеми 2 перебувають у хорошому тепловому контакті з металевими шинами 3, які виконують роль

теплостоків. По них теплова енергія надходить до колектора тепла 4, який охолоджується за допомогою повітряного або рідинного теплообмінника 5.

Кондуктивне охолодження найчастіше застосовується як метод локального охолодження. Проте останнім часом такий вид охолодження часто використовують у блоках з дуже високою щільністю монтажу як спосіб загального охолодження.

До кондуктивного охолодження відноситься охолодження за допомогою термоелектричних пристроїв (рис. 8.8).

У цьому випадку охолоджуване тіло перебуває в контакті з холодним спаєм термобатарей, який виконує роль стоку теплової енергії.

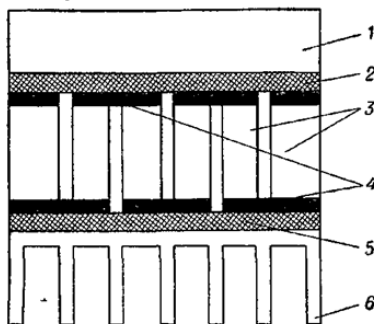


Рисунок 8.8. Схема термоелектричного охолодження

На схемі 1 – охолоджуване тіло, 2 – шар електроізоляції на холодному спаї термобатарей, 3 – термоелементи, 4 – комутаційні пластини, 5 – шар електроізоляції на гарячому спаї, 6 – радіатор.

8.5.1 Радіатори

Радіаторами називають пристрої, призначені для відведення тепла від окремих теплонавантажених елементів (напівпровідникових пристроїв середньої та великої потужності) у навколишнє середовище. Щоб радіатор виконував свої функції, він повинен мати такі властивості:

- тепловий опір в місці контакту джерела теплової енергії (наприклад, корпусу транзистора) з радіатором повинен бути мінімальним;
- площа поверхні радіатора повинна бути максимально можливою;
- тепловий опір радіатора повинен бути мінімальним.

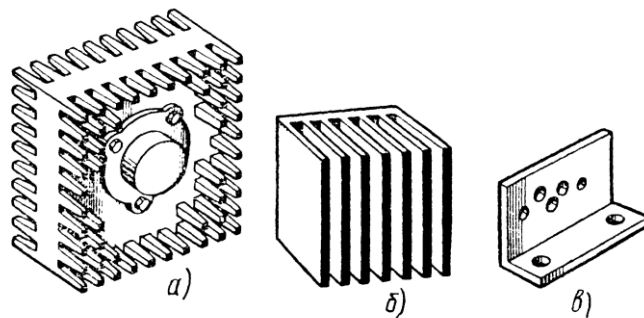
На рисунку 8.9 зображено три варіанти конструкції радіаторів.

Штирковий радіатор має найбільшу площу поверхні і може забезпечити необхідну температуру корпусу напівпровідникового пристрою (НПП) при мінімальних габаритах радіатора. Радіатор пластинчатий займає проміжне положення за якістю тепловідведення і найгірші параметри у радіатора без ребер.

Для забезпечення малого теплового опору між корпусом НПП і радіатором, необхідно забезпечити велику площу дотику між ними. Тому поверхню радіатора добре обробляють, щоб усунути мікронерівності. Іноді для забезпечення надійного теплового контакту між двома тілами встановлюють

прокладку з м'якого матеріалу, який добре проводить тепло, або використовують теплопровідні пасти.

Слід мати на увазі, що будь-яка ізоляційна прокладка збільшує тепловий опір між корпусом НПП і



радіатором.

Рисунок 8.9. Радіатори: а – штирковий (голковий); б – пластинчатий; в – без ребер

8.5.2 Визначення розмірів і параметрів нагрітої зони

Для спрощеної теплової моделі, коли необхідно визначити середню поверхню нагрітої зони, її еквівалентні розміри розраховують за формулою $V_{an} = L_1 L_2 h$, де V_{an} – об'єм апарату; L_1, L_2 – розміри нижньої стінки його корпусу, м; h – висота корпусу, м.

Об'єм деталей V_d дорівнює сумі об'єму шасі і об'ємів всіх деталей, встановлених на ньому. Для апаратів касетної конструкції об'єм деталей дорівнює сумі об'ємів всіх плат і всіх деталей, встановлених на них.

Коефіцієнт заповнення об'єму апарату

$$k_3 = \frac{V_d}{V_{an}}.$$

Зведений розмір основи нагрітої зони (всі розміри в м)

$$l_{36} = \sqrt{L_1 L_2}.$$

Зведена висота нагрітої зони

$$h_{36} = h k_3.$$

Зведена висота повітряного проміжку між нагрітою зоною і кожухом

$$h_1 = \frac{h - h_{36}}{2}.$$

Поверхня корпусу апарату

$$S_k = 2(L_1 L_2 + L_1 h + L_2 h).$$

Поверхня нагрітої зони (м²), що складається з кількох касет:

$$S_{31} = 2(L_x L_y + L_x L_z + L_z L_y)$$

де L_x, L_y, L_z – ширина, довжина і висота проміжку, зайнятого касетами,

Зведена висота деталей, розміщених на касеті

$$h_{3\phi} = \frac{\sum V_{\phi}}{L_x L_z}$$

Зведена товщина касети

$$\delta_{3\phi} = \delta + h_{3\phi},$$

де δ – товщина друкованої плати, на якій закріплені деталі, м.

Зведена ширина проміжку між касетами, м

$$b_{3\phi} = b - h_{3\phi}$$

де b – відстань між друкованими платами, м.

Площа (м²) поверхонь касет, обернених назустріч одна одній

$$S_{32} = 2L_x L_y (m - 1)$$

де m – кількість касет.

Площа (м²) поверхонь плат, які випромінюють енергію в бік кожуха:

$$S_{33} = 2(L_x L_y + m \delta_{3\phi} (L_x + L_z))$$

Питому потужність корпусу і нагрітої зони визначають за формулами

$$P_k = \frac{P}{S_k}$$

$$P_3 = \frac{P}{S_3}$$

де P – потужність, що виділяється в корпусі або нагрітій зоні, Вт; S – поверхня, м^2 .

Знаючи потужність, визначають перегрів нагрітої зони, користуючись відповідними графіками.

Але можна ці дані розрахувати наближено.

8.5.3 Наближена оцінка середньої температури поверхні корпусу і середньої температури касет для апаратури з вертикальної орієнтацією нагрітої зони

Для апаратури касетної конструкції орієнтацію нагрітої зони вважають вертикальною, якщо в проміжках між касетами існує теплоперенос за рахунок конвективних потоків повітря. Слід враховувати, що навіть при вертикальних проміжках конвективний перенос тепла відсутній, якщо виконується хоча б одна з наступних умов:

а) середній проміжок між поверхнею деталей і площиною сусідньої касети не перевищує 2–3 мм;

б) тиск всередині апарату менший, ніж 10 мм рт. ст.;

в) апарат перебуває в невагомості.

При цих умовах орієнтацію нагрітої зони в апаратах касетної конструкції умовно вважають горизонтальною.

8.5.3.1 Кожух з ущільненням

Оцінка вказаних параметрів може бути отримана з похибкою $\pm 40\%$ за такими формулами.

Середній перегрів корпусу порівняно з температурою оточуючого середовища ($^{\circ}\text{C}$)

$$\Delta t_k = \frac{P}{9S_k}$$

де P – потужність апарату, Вт; S_k – площа поверхні корпусу, м^2 .

Середній перегрів поверхні касет порівняно з температурою оточуючого середовища ($^{\circ}\text{C}$)

$$\Delta t_{\text{кас}} = \Delta t_k (1 + CA),$$

де

$$A = 1 + \frac{S_k}{S_{33} + \frac{0,055}{\delta_{36}} S_{32}},$$

$$C = \frac{4,55S_k}{S_k + 3S_{31}A}$$

8.5.3.2 Кожух з перфораціями

Для врахування впливу перфорацій на температуру перегріву необхідно обчислити коефіцієнт перфорації

$$k_{\Pi} = S_0 / L_1 L_2$$

де S_0 – сумарна площа отворів в дні кожуха, m^2 (вважається, що площа отворів у дні та кришці однакова).

Після цього за графіком на рис. 8.10 знаходять коефіцієнт a .

Середньо поверхнева температура перегріву з врахуванням впливу перфорацій

$$\Delta t_{\text{кас.п}} = a \Delta t_{\text{кас.}}$$

Обчислене за зведеними формулами значення перегріву характеризує середню температуру нагрітої зони, проте не в будь-якій точці.

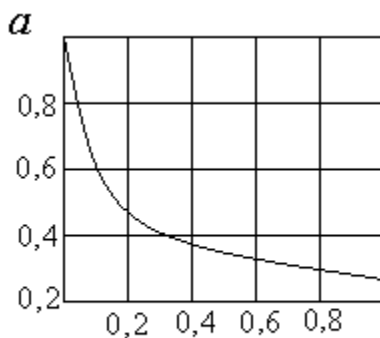


Рисунок 8.10 Залежність теплообміну конвекцією від коефіцієнта перфорації

У радіотехнічних пристроях теплова енергія виділяється в окремих вузлах і пристроях, таких як: радіолампи, мотори, трансформатори, резистори, напівпровідникові пристрої, мікросхеми тощо.

Оскільки ці елементи розміщені нерівномірно по об'єму апарату, то в окремих його точках отримується концентрація теплової енергії, яка супроводжується локальними підвищеннями температури. При цьому в тяжких температурних умовах можуть опинитися як самі джерела тепла, так і інші вузли та елементи, розміщені поряд.

Необхідно прийняти заходи для того, щоб температура нагрівання для будь-якого елемента не перевищувала допустимі значення.

При цьому доводиться йти двома шляхами: знижувати загальну (середню) температуру нагрівання апарату і відведення тепла від окремих найбільш нагрітих ділянок об'єму.

Лекція №9

Паразитні процеси в радіоелектронній апаратурі та способи захисту від них. Основні види паразитних зв'язків.

Складна РЕА, зокрема і біомедичного призначення, може містити різні елементи, що працюють на різних рівнях потужності максимальне відношення яких може досягати величини 200 дБ. Небезпека виникнення взаємних завад в цих умовах дуже велика. Вона посилюється ще й тому, що живлення різних приладів у більшості випадків здійснюється через спільну енергетичну мережу.

Під паразитним наведенням розуміють передачу напруги, не передбачену схемою чи конструкцією, від одного радіопристрою або його частини до другого. Таке наведення виникає внаслідок паразитного зв'язку між ними, зв'язку по електричних колах, що з'являється в пристроях незалежно від бажання конструктора.

При розгляді паразитних наведень доводиться мати справу з трьома елементами:

- а) джерелом наведення;
- б) приймачем наведення;
- в) паразитним зв'язком між ними.

Слід пам'ятати, що наведені напруги та струми підлягають загальним законам електротехніки без будь-яких відхилень. Труднощі, що виникають при розгляді питань, пов'язаних з паразитними зв'язками зумовлені тим, що ці зв'язки не наносять на схеми і виникають вони між різними частинами пристрою. Ліквідація наведень зводиться, перш за все, до виявлення вказаних трьох елементів, що часто виявляється складною задачею. Вона ускладнюється ще й тим, що в більшості випадків паразитні наведення створюються кількома джерелами і в кількох колах зворотного зв'язку. В цих умовах виявлення слабших джерел виявляється можливим тільки після усунення сильніших джерел та зв'язків.

9.1 Основні види паразитних зв'язків

Між двома електричними колами, які перебувають між собою на деякій відстані, можуть виникати електромагнітні зв'язки через [2]:

- електричне поле;
- магнітне поле;
- електромагнітне поле випромінювання;
- проводи та хвилеводи, що з'єднують ці кола.

Напруженість ближніх електричного і магнітного полів у вільному просторі обернено пропорційна квадрату відстані від елемента, який породжує поле. Напруженість електромагнітного поля випромінювання обернено

пропорційна першому степеню відстані. Напруга на кінці провідної лінії або хвилеводу із збільшенням відстані спадає дуже повільно, за винятком випадку стоячих хвиль в лінії, коли невеликі зміни відстані можуть призводити до значного збільшення або зменшення напруги.

З цієї залежності різних видів зв'язку від відстані випливає, що при малих відстанях діють усі чотири види зв'язку. Із збільшенням відстані, в першу чергу зникають зв'язки через ближні електричне і магнітне поля, в другу чергу – перестає впливати електромагнітне поле випромінювання, і на великій відстані впливає лише зв'язок по проводах та хвилеводах.

9.2 Захист від впливів електромагнітних полів

Під екрануванням розуміють спосіб локалізації електромагнітного поля (ЕМП) в заданому об'ємі. При цьому розрізняють задачу зовнішнього і внутрішнього екранування.

У першому випадку з метою забезпечення завадостійкості необхідно захистити електричні кола з відносно низькими енергетичними рівнями від впливу зовнішніх полів завад.

У другому випадку з метою забезпечення електромагнітної сумісності чи отримання необхідної стійкості необхідно обмежити поширення власного внутрішнього поля об'єкта заданим об'ємом.

У вільному просторі (на відстані 5-10 довжин хвиль від джерела завади) відношення електричної складової ЕМП випромінювання до магнітної складової цього поля дорівнює хвильовому опору вільного простору

$$\frac{E}{H} = \rho_{np} = 120\pi.$$

Поблизу джерел це співвідношення порушується. У цьому випадку, якщо $E \gg \rho_{np} H$, то поле завади умовно називають електричним, якщо $H \gg E/\rho_{np}$, – магнітним. У реальних умовах помітні відхилення від даної рівності мають місце на низьких частотах, наприклад, поблизу силового трансформатора або кола постійної наруги живлення, тому такі поля називають магнітостатичними або електростатичними. Відповідно розрізняють електромагнітне, магніто статичне і електростатичне екранування.

Дія екрану залежно від властивостей екранованого поля і його взаємодії з матеріалом екрану може базуватися на одному з трьох принципів: відбивання від екрану, шунтування на екран, поглинання екраном. Відповідні екрани називають відбиваючими (електромагнітні екрани), шунтуючими (магнітостатичні екрани) і поглинаючими (електростатичні та електромагнітні екрани).

Ефективністю екранування ξ називають відношення напруг, струмів, напруженостей електричного і магнітного полів в екранованому просторі при відсутності екрану та при його наявності:

$$\xi = \frac{U}{U'} = \frac{I}{I'} = \frac{E}{E'} = \frac{H}{H'}.$$

В техніці провідного зв'язку цю величину прийнято задавати в неперах

$$B = \ln \xi = 0,115A \text{ (Нп)}.$$

В радіотехніці ефективність екранування задають в децибелах

$$A = 20 \lg \xi = 8,7B \text{ (дБ)}$$

9.3 Принципи екранування електричного поля

Нехай тіло А (джерело завади) має деяку постійну або повільно змінну відносно землі напругу U_A (див. рис. 9.1, а). В тілі В (приймачі) внаслідок електростатичної індукції виникають заряди і воно набуває відносно землі потенціал U_B , залежний від U_A . Для його визначення звернемося до еквівалентної схеми (рис. 9.1, б), де паразитний зв'язок між А і В відображається ємнісним опором $Z_{\text{пар}} = \frac{1}{\omega C_{\text{пар}}}$, а нижнє плече подільника – є

вхідним опором приймача, як правило, ємнісного характеру $Z_B = \frac{1}{\omega C_B}$.

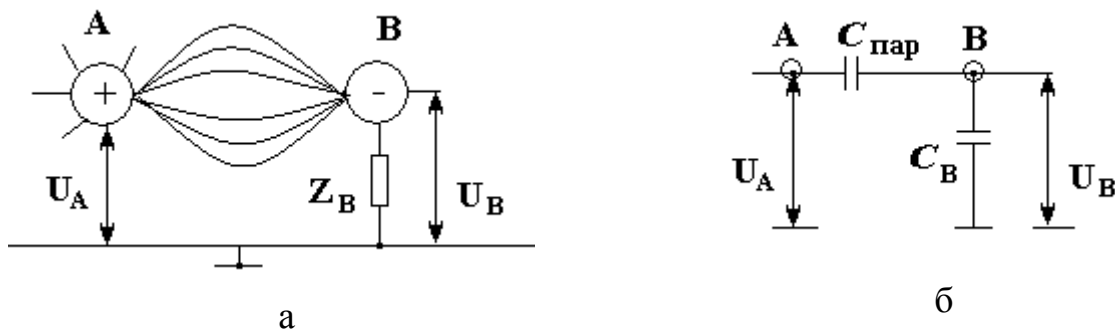


Рисунок 9.1 Електростатичні наведення та їх еквівалентна схема

$$U_B = U_A \frac{Z_B}{Z_B + Z_{\text{пар}}} = U_A \frac{C_{\text{пар}}}{C_B + C_{\text{пар}}}.$$

Для зниження наведеної напруги U_B необхідно зменшити паразитну ємність $C_{пар}$ і збільшити ємність C_B . Якщо таких заходів замало, то вводять електростатичний екран, який являє собою тіло з хорошою провідністю (наприклад, металевий лист), розміщене між об'єктами екранування.

Наявність екрануючого листа розділяє ємність $C_{пар}$ на дві послідовно з'єднані ємності C_1, C_2 (див. рис. 9.2, а), до яких паралельно приєднана невелика залишкова ємність $C'_{пар}$. Для визначення напруги U_B можна, нехтуючи залишковою ємністю $C'_{пар}$, вважати, що напруга в точці В визначається напругою на екрані U_ξ , який замінює в цьому випадку точку А.

Згідно попередніх міркувань можна записати

$$U_B = U_\xi \frac{C_2}{C_B + C_2}$$

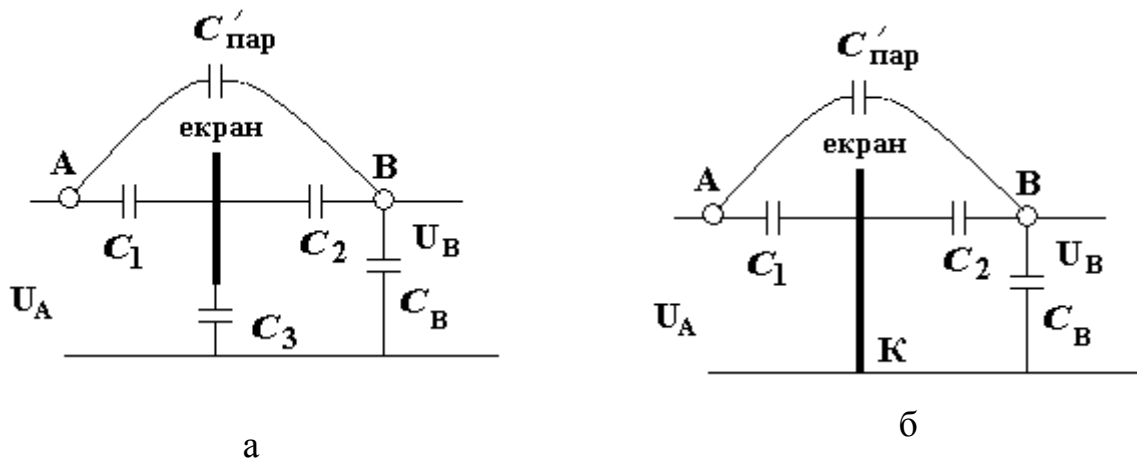


Рисунок 9.2 Дія екрану: а) не з'єднаного з корпусом приладу; б) з'єднаного з корпусом приладу.

Напруга на екрані, з врахуванням тих же міркувань і ємності між екраном і корпусом, дорівнюватиме

$$U_\xi = U_A \frac{C_1}{C_3 + C_1}$$

І остаточно, напруга в точці В після встановлення екрану дорівнюватиме

$$U_B = U_A \frac{C_1 C_2}{(C_B + C_2)(C_1 + C_3)}$$

Ця напруга після встановлення екрану може виявитися як вищою, так і нижчою, ніж до його встановлення.

Якщо екран встановлено так, що $C_1 \gg C_3$ (рис. 9.2, а), то $U_\xi \approx U_A$. В результаті, оскільки ємність C_2 завжди менша, ніж C_{nap} , напруга U_B після встановлення екрану буде більшою, ніж без нього і екран виявляється шкідливим.

Якщо екран встановлено так, що ємність C_3 відносно корпусу велика, то напруга при наявності екрану буде меншою, ніж без нього, тобто екранування стає ефективнішим.

Збільшення C_3 до ∞ рівносильне короткому замиканню між екраном і корпусом (рис. 9.2, б). Якщо при цьому не враховувати залишкової паразитної ємності C'_{nap} , то напруга U_B дорівнюватиме нулю і дана конструкція дасть ідеальний екрануючий ефект. Насправді ця напруга не рівна нулю, а визначається виразом:

$$U'_B = U_B \frac{C'_{nap}}{C'_{nap} + C_2 + C_B} \approx U_B \frac{C'_{nap}}{C_2 + C_B}$$

і є значно меншою за U_B до встановлення екрану.

Фізичний зміст екрануючого ефекту, який отримується від металевого листа, з'єднаного з корпусом приладу полягає у створенні короткого замикання на корпус для більшої частини паразитної ємності, яка є між точками, розділеними екраном.

Ефективність екранування електричного поля

$$\xi = \frac{U_B}{U'_B} \approx \frac{C_{nap}}{C'_{nap}}$$

Будь-які міри, що призводять до зменшення C'_{nap} , збільшують ефективність екранування.

Від якості з'єднання екрану з корпусом приладу і частин екрану між собою сильно залежить екрануюча дія. Особливо важливо не мати з'єднувальних проводів між частинами екрану та корпусом. Індуктивний опір такого проводу із збільшенням частоти зростає, що еквівалентно зменшенню ємності C_3 . На короткохвильовому і, особливо, ультракороткохвильовому діапазонах провідники, довжиною в кілька сантиметрів, можуть різко погіршити екранування приладу.

На коротких хвилях дециметрового і сантиметрового діапазонів з'єднувальні провідники і шини між екранами недопустимі.

Важливо також забезпечити надійний контакт (незмінний в часі) між частинами екрану.

9.4 Принципи екранування магнітостатичного та повільно змінного магнітного поля

Від постійного і повільно змінного магнітного поля захищають за допомогою екранів, виготовлених з феромагнітних матеріалів (пермалюю або сталі) з великою відносною магнітною проникністю μ_r . Цей вид екранування називають магнітостатичним екрануванням або шунтуванням магнітного поля екраном. Його використовують рідко, тільки при необхідності подавити наведення на частотах 0...1 кГц. Тут ефективність екранування не залежить від частоти і її можна наближено обчислити за формулою

$$\xi = 1 + \frac{\mu_r d}{D}$$

де μ_r – відносна магнітна проникність матеріалу екрану; d – товщина стінок екрану; D – діаметр еквівалентного сферичного екрану, близький до довжини стінки кубічного екрану.

9.5 Принципи екранування високочастотного магнітного поля

Екранування змінного магнітного поля здійснюють за допомогою екранів, виготовлених з немагнітних і феромагнітних металів. Воно базується на використанні явища електромагнітної індукції, яке призводить до збудження наведених е.р.с. і струмів.

Якщо на шляху змінного магнітного поля поставити, наприклад, мідний циліндр, то в ньому виникатимуть змінні е.р.с., які, в свою чергу, створюватимуть змінні індукційні вихрові струми (струми Фуко). Магнітне поле цих струмів буде замкнутим: всередині циліндра воно буде напрямлене назустріч збуджуючому полю, а зовні – в той же бік, що і збуджуюче поле. Результуюче поле виявиться підсиленням зовні і ослабленням всередині такого циліндра, в цьому і є його екрануюча дія. Цей вид екранування називається електромагнітним або екрануванням вихровими струмами.

Вихрові струми в екрануючому циліндрі розподіляються нерівномірно по його перерізу. Це викликане явищем поверхневого ефекту (“скін-ефекту”), суть якого полягає в тому, що змінне магнітне поле послаблюється по мірі проникнення в глибину металу, оскільки внутрішні шари екрануються вихровими струмами, що циркулюють в поверхневих шарах.

Через це, чим інтенсивніші вихрові струми, тим на меншу глибину вони проникають в екран, напруженість змінного магнітного поля по мірі заглиблення в метал спадає за експоненціальним законом:

$$\frac{\text{густина струму на глибині } x}{\text{густина струму на поверхні}} = e^{-x/\delta}$$

де

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \text{ (см)}$$

– показник зменшення поля і струму, який називають еквівалентною глибиною проникнення. Тут σ – питома провідність матеріалу екрану; $\mu = \mu_0 \mu_r$ – магнітна проникність матеріалу; μ_0 – магнітна проникність вакууму; μ_r – відносна магнітна проникність матеріалу.

У таблиці 9.1 наведені значення еквівалентної глибини проникнення для різних матеріалів, розраховані за даною формулою.

Для розрахунку ефективності екранування вихровими струмами вважатимемо, що вона визначається двома факторами: зворотним полем, створюваним струмами, що протікають в екрані та поверхневим ефектом в матеріалі екрану. На низьких частотах, коли товщина екрану $d < \delta$, поверхневий ефект незначний, тобто діє лише перший фактор, розрахунок здійснюють за наближеним виразом

$$\xi \approx \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \mu_0 \sigma D d}{2m} \right)^2}$$

На високих частотах при $d > \delta$ діють обидва фактори і ефективність обчислюють за формулою

$$\xi = e^{\frac{d}{\delta}} \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8 m \mu_r \delta} \right)$$

Таблиця 9.1 Електричні властивості екрануючих матеріалів

Характеристика	мідь	латунь	алюміній	Сталь	сталь	пермалой
Питомий опір ρ ,						

Ом · мм ² /м	0,0175	0,06	0,03	0,1	0,1	0,65
Питома провідність σ , См · см ³	$57 \cdot 10^4$	$16,6 \cdot 10^4$	$33 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$1,54 \cdot 10^4$
Відносна магнітна провідність μ_r	1	1	1	50	100	12000
Еквівалентна глибина проникнення δ , мм, при частоті, Гц						
	6,7000	12,4000	8,8000	—	1,540	0,380
10^2	2,1000	3,9000	2,7500	—	0,490	0,120
10^3	0,6700	1,2400	0,8800	—	0,154	0,038
10^4	0,2100	0,3900	0,2750	—	0,049	0,012
10^5	0,0670	0,1240	0,0880	0,0230	—	—
10^6	0,0210	0,0390	0,0275	0,0070	—	—
10^7	0,0067	0,0124	0,0088	0,0023	—	—
10^8						

В останніх двох виразах d – товщина стінок екрану, см; D – ширина коробки прямокутного екрану або діаметр циліндричного чи сферичного екрану, см; m – коефіцієнт форми екрану: для прямокутного $m=1$; для циліндричного $m=2$; для сферичного $m=3$.

9.6 Одночасне екранування електричного і магнітного полів

Електричне і магнітне поля екрануються одними і тими ж конструкціями, але діють по-різному. Струми, що проходять по екрану під дією магнітного поля, значно переважають струми, що виникають при екрануванні електричного поля. Причиною цього є те, що струми збуджені в екрані магнітним полем, протікають в короткозамкнутому поверхневому шарі самого екрану, опір якого невеликий. У той час, як у коло струму, що протікає при електричному екрануванні завжди включений великий опір паразитної ємності між екранованою точкою та екраном.

Ефективність електричного екрану майже повністю визначається наявністю короткого замикання між екраном і корпусом приладу.

При екрануванні магнітного поля, приєднання екрану до корпусу зовсім не змінює величини збуджених в екрані струмів, а отже не впливає на ефективність магнітного екранування.

Зміна частоти не впливає на дію електричного екрану так само як і питома провідність матеріалу, з якого виготовлено екран.

Магнітне екранування повністю залежить від частоти. Чим нижча частота, тим слабше діє магнітний екран і тим товстішим доводиться його робити.

Якщо через отвір в пластині з ідеального провідника пропустити провідник, по якому тече струм високої частоти, то в пластині

збуджуватимуться струми такої сили і напрямку, що сума струмів через поперечний переріз отвору дорівнюватиме нулю. Це необхідно враховувати і встановленні перегородки, що розділяє екранований простір на дві частини. В такому екрані виникають блукаючі струми, що створюють високочастотні різниці потенціалів між окремими точками екрану. Тільки приєднання, наприклад нижнього, краю отвору до корпусу дає можливість звільнити корпус і перегородку від блукаючих струмів. Це справедливо лише для низьких частот. На високих частотах неможливу звільнити корпус від блукаючих струмів.

Якщо на шляху змінного магнітного потоку встановити металевий лист з ідеального провідника з отвором, то сумарний потік через отвір дорівнюватиме нулю.

Малі отвори майже не погіршують якість екранування. Довгі вузькі щілини, допустимі в електричному екрані, є небезпечними в магнітному, якщо вони напрямлені поперек напрямку вихрових струмів. У випадках, коли екрануються складні електричні кола, в яких напрями магнітних потоків можуть бути найрізноманітнішими, слід уникати довгих щілин. Бажано кришки і екрани з'єднувати між собою і з корпусом приладу так, щоб можливі щілини не перевищували 0,1...1,0% довжини хвилі. Це важливо і для екранування електричного поля, оскільки від якості контакту між частинами екрану, який визначає різницю потенціалів між ними, майже повністю залежить ефективність електричного екрану.

Лекція №10

Методи проектування екранів, фільтрів, пошук джерел завад і усунення їх при конструюванні приладу

10.1 Методи проектування екранів

Найчастіше для захисту схем від завад використовують дорогі екрани, хоча при правильному підході до конструювання цих завад можна уникнути. Наприклад, якщо поряд з електронно-променевою трубкою (ЕПТ) пристрою відображення змонтувати звичайний мережевий трансформатор (50 Гц), то зображення на екрані осцилографа буде випадковим чином спотворюватися. Щоб уникнути цього, можна встановити дорогий тришаровий екран, проте краще позбутися причини виникнення завад ще на етапі конструювання. Для цього необхідно:

- вибрати трансформатор (наприклад, тороїдальний) з низьким розсіюванням;
- змонтувати його в нижній частині корпусу і закрити сталеву кришкою;
- розмістити його якомога далі від електронно-променевої трубки, так, щоб поле розсіювання трансформатора було напрямлене вздовж її осі;
- передбачити можливість розміщення навколо ЕПТ звичайного стандартного одношарового екрану.

Як вже було сказано вище ефективність екранування виражають у децибелах і обчислюють за формулою:

$$E = 10 \lg \frac{\text{потужність сигналу без екрану}}{\text{потужність сигналу з екраном}} \text{ [дБ]}.$$

Якщо екран знаходиться в повітрі чи вакуумі, цей вираз набуває вигляду:

$$E = 20 \lg \frac{\text{напруженість електричного поля без екрану}}{\text{напруженість електричного поля з екраном}} =$$

$$20 \lg \frac{\text{напруженість магнітного поля без екрану}}{\text{напруженість магнітного поля з екраном}}$$

У більшості випадків для захисту від завад і наведень ефективність екранування повинна дорівнювати 30–60 дБ. На частотах вище 100 кГц одношарові екрани забезпечують ефективність екранування 40–70 дБ, а двошарові – до 120 дБ. Отвори та зазори негативно впливають на послаблення електричних і високочастотних магнітних полів, тоді як ослаблення

низькочастотних магнітних полів визначається матеріалом екрану і його товщиною.

На рисунку 10.1 електромагнітна хвиля з частотою f [Гц] і характеристичним опором $|Z_\omega|$ зустрічає на своєму шляху екран товщиною T [м] і магнітною проникністю $\mu = \mu_r \mu_0 \approx 1,257 \mu_r$ [мкГн/м] і питомим опором ρ [Ом·м]. На частоті f характеристичний опір екрану можна обчислити за формулою:

$$|Z_s| = (2\pi i f \rho)^{1/2} / [1 - \exp(-T/\delta)]$$

Де $\delta = (\rho / \pi i f)^{1/2}$ [м] – товщина скін-шару.

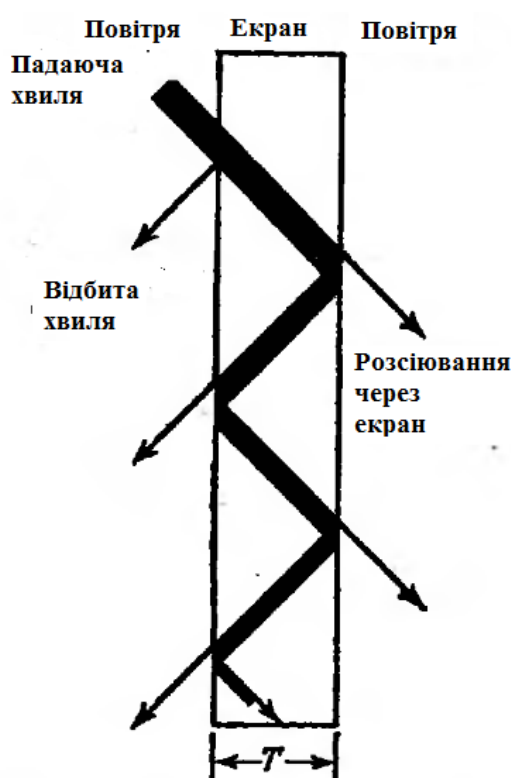


Рисунок 10.1. Відбиття та розсіювання електромагнітних хвиль при їх екрануванні

(Скін-ефект (від англ. *skin* — шкіра) — явище проникнення електромагнітного поля в провідник на певну глибину, яка називається **скін-шаром**. Водночас, скін-ефект призводить до протікання струму в провіднику в основному в області скін-шару, і, як наслідок, збільшення опору провідника. Тобто скін-ефект - це проходження змінного електричного струму високої частоти не через увесь переріз провідника, а переважно лише у поверхневому шарі. Інша назва – поверхневий ефект).

У зв'язку з тим, що характеристичні опори хвилі та екрану мають різні значення, призводить до того, що хвиля частково відбивається від границі розділення повітря – екран і частково проникає крізь екран, де частина енергії перетворюється на тепло. Досягнувши межі екран – повітря, хвиля частково відбивається у зворотному напрямі, а частково проходить крізь екран. Електромагнітна хвиля, яка поширюється в матеріалі багаторазово відбивається і зрештою повністю розсіюється або перетворюється на тепло. Ефективність екранування можна виразити у вигляді:

$$E = R + A + B \text{ [дБ]},$$

де R – описує процес початкового відбивання;

A – послаблення;

B – багаторазового відбивання.

При $T > 3\delta$ характеристичний опір екрану не залежить від його товщини. У загальному випадку для ефективного екранування необхідно, щоб $|Z_s| \leq 1$ ($\rho < 0,05$).

Високий характеристичний опір електричних полів сприяє їх відбиванню на межі повітря – екран, тому в цьому випадку дуже тонкі екрани є ефективними.

Магнітні поля з низьким характеристичним опором легко проникають через межу повітря – екран. При цьому частина хвилі, яка не поглинулася екраном, після багатократного внутрішнього відбивання, в кінцевому рахунку розсіюється. Тому екрани, призначені для захисту від магнітних полів, повинні бути товстими, порівняно з товщиною скін-шару δ , мати високу магнітну проникність і низький питомий опір ρ .

Щоб уникнути насичення екрану, необхідно між ним і компонентами передбачити зазор не менше 6 мм. Якщо екрани виготовлені з фольги, перекриття на місці шва повинно складати більш ніж 13-20 мм, а радіуси кривизни повинні принаймні вдвоє перевищувати товщину екрану.

У загальному випадку екран, товщина якого забезпечує необхідну механічну міцність, забезпечує захист від усіх видів електромагнітного випромінювання, крім низькочастотних магнітних полів. Ефективний захист від електромагнітного випромінювання та від магнітних полів частотою вище 1 МГц забезпечують мідні або алюмінієві екрани. Для екранування магнітних полів частотою 10 кГц – 1 МГц слід застосовувати стальну або залізну фольгу, а для екранування магнітних полів частотою менше 10 кГц, коли розмір і маса екрану стають критичними – пермалой. Цей матеріал необхідно захищати від ударів, оскільки при падінні такого екрану з висоти 0,6 м ефективність екранування може знизитися вдвоє. Встановлення додаткових екранів для зменшення рівня випромінюваних завад може призвести до резонансу в екрані, ймовірність якого зростає, коли найбільший розмір екрану співрозмірний з половиною довжини хвилі випромінювання. Для уникнення резонансу екрани

необхідно виготовляти з низьким питомим опором і високою магнітною проникністю, щоб вони поглинали, а не відбивали електромагнітне випромінювання.

Для екранування котушок індуктивності, трансформаторів і кабелів, а також для з'єднання частин екрану використовують алюмінієві та мідні стрічки. Найбільший екрануючий ефект створюють гофровані мідні стрічки, гофровані алюмінієві стрічки, мідні та алюмінієві стрічки з провідною клейкою речовиною, гладкі мідні та алюмінієві стрічки. Звичайна алюмінієва фольга (товщиною ≈ 25 мкм) ефективно екранує від електричних і магнітних полів частотою ≥ 100 кГц.

Екрани, які захищають від магнітних полів низькочастотного діапазону, як правило, складаються з шару міді, шару металу з низькою магнітною проникністю і високим полем насичення та шару металу з високою магнітною проникністю і низьким полем насичення.

Багатошарові екрани найбільш ефективні, якщо між шарами забезпечити наявність невеликих повітряних зазорів товщиною 0,5 – 0,75 мм або однакову товщину металевих шарів. Усі екрани, які мають шари з високою магнітною проникністю, проходять спеціальну термообробку. З ними треба поводитися дуже обережно: не піддавати механічній обробці, різкому охолодженню та ударам, щоб уникнути втрати ними екрануючих властивостей.

Ряд фірм випускає екрануючу фольгу з металу з високою магнітною проникністю. З неї вирізають смужку відповідних розмірів, передбачивши широкі ділянки перекриття і обережно надають екрану відповідну форму. Необхідно, щоб шви були орієнтовані вздовж магнітних плів. Готові екрани не можна піддавати зварюванню або впливу вібрацій. Екрани та прокладки з такої фольги отримують штампуванням. Гнучкі екрануючі пластини складаються з фольги з армуючим діелектриком, з них теж можна штампувати екрани. Для екранування кабелів і з'єднувачів випускають гнучкі металеві обплетення, які можна використовувати і як заземлюючі перемички.

На даний час загальною проблемою є екранування литих пластмасових корпусів. У пластмасу можна вводити провідні наповнювачі, які забезпечують ефективність екранування 30-80 дБ, проте при цьому погіршуються механічні властивості пластмаси, а наповнювач у ній розподіляється нерівномірно. Крім того, при цьому важко забезпечити якісні контакти (через збагачення поверхні смолою) та створення однорідного кольорового покриття. Нанесення такого покриття на корпус перетворюється в окрему операцію.

Інший спосіб екранування пластмасових корпусів полягає в нанесенні на них провідних покриттів. За допомогою вакуумного напилювання можна нанести шар алюмінію товщиною 4 – 5 мкм. Проте для хорошої адгезії провідного покриття, між ним і пластмасою повинен знаходитися базовий шар (переважно міді). Крім того, у вологих умовах покриття може піддаватися корозії. Нанесення мідних, нікелевих чи срібних покриттів з товщиною шару від 50 до 75 мкм за допомогою пульверизатора, забезпечує ефективність

екранування 30 – 65 дБ. Цей найпростіший метод застосовують при створенні дослідних зразків і у дрібносерійному виробництві. У дуговому розряді можна нанести цинкові покриття товщиною 50 – 125 мкм, які мають поверхневий опір ≈ 20 мОм на одиницю площі. Вони забезпечують ефективність екранування 70 – 90 дБ. Щоб запобігти відшаровуванню цинкової плівки при перепадах температури, перед нанесенням цинку поверхню необхідно обробити. За допомогою хімічного осадження на мідь можна наносити нікель. Таке покриття забезпечує ефективність екранування 55 – 110 дБ.

Зокрема ЕПТ, сенсорні екрани, оглядові вікна покривають тонким провідним прозорим шаром. Найбільше поширення отримали оксид олова, оксид індію-олова і золото. Покриття повинні мати поверхневий опір не більше 1 Ом на одиницю площі і забезпечувати ефективність екранування 6 дБ. Можна також на оглядові вікна натягнути дрібну металеву сітку, проте в будь-якому випадку для з'єднання провідного покриття або металеві сітки з корпусом як правило застосовують провідні прокладки.

Наявність в екранах зазорів та отворів знижують ефективність екранування. Тому при розробці конструкції екрану необхідно прагнути мінімізувати їх вплив.

На рисунку 10.2 показано прямокутну щілину (наприклад для охолодження системи).

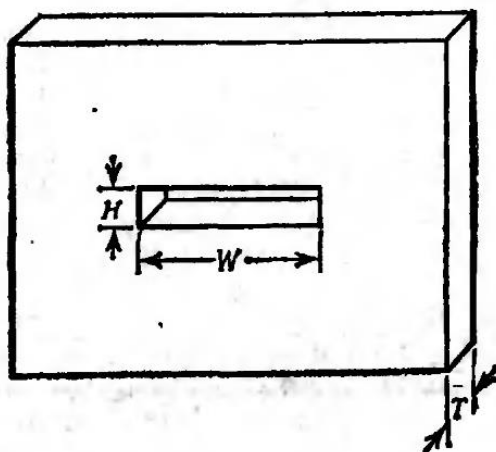


Рисунок 10.2. Екран з прямокутною щілиною.

Якщо розміри щілини $W \times H$, $W \geq H$, а товщина екрану T , то ефективність екранування сигналу з довжиною хвилі $\lambda \gg 2W$ можна розрахувати за формулою:

$$E = -20 \lg[(WH)^{1/2} / 0,24\lambda] - 20 \lg\{\exp\{-(\pi T / W)[1 - (2\omega\lambda)^2]^{1/2}\}\}.$$

На рисунку 10.3 показано екран з круглим отвором для встановлення органів регулювання, вимірювання та вентиляції.

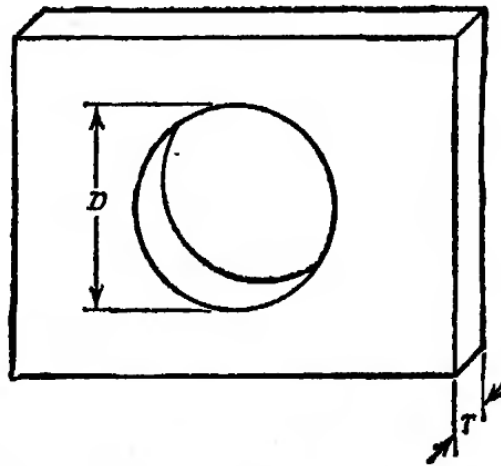


Рисунок 10.3. Екран з круглим отвором.

Нехай D – діаметр отвору, а T – товщина екрану. Тоді ефективність екранування сигналу з довжиною хвилі $\lambda \gg \pi D$ обчислюють за формулою:

$$E = -20\lg(D/0,3\lambda) - 20\lg\{\exp\{-(2\pi T/1,707D)[1 - (1,707D/\lambda)^2]^{1/2}\}\}.$$

Перший член у цьому рівнянні описує вплив отвору, а другий – хвильовий ефект.

У загальному випадку діаметр отвору або ширина щілини не повинні перевищувати $0,05 \lambda$ [м].

Якщо в екрані наявні шви, то вони повинні бути максимально щільними. Найкращими є суцільні зварні шви (рис. 10.4, а-в). Їм дещо уступають за якістю шви з перекриттям (рис. 10.4, г) Задовільними є і шви отримані за допомогою перекривання прокатаних ділянок (рис. 10.4, д); їх можна стискати через кожні 50 мм для створення щільних контактів. При цьому, ділянки, які перекриваються, повинні бути якомога ширшими.

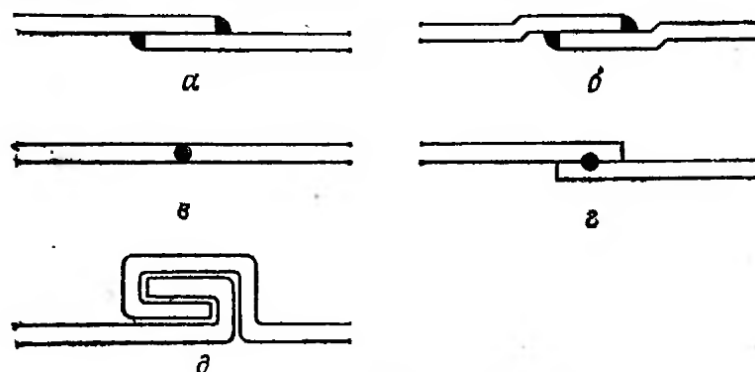


Рисунок 10.4. Постійні з'єднання в екранах: а – суцільний зварний шов, б – суцільний зварний шов при ступінчастому з'єднанні ділянок шва, в – шов, отриманий зварюванням встик, г – шов, при точковому зварюванні, шов – внапусток.

Крім того, можна використовувати тимчасові з'єднання (рис.10.5).

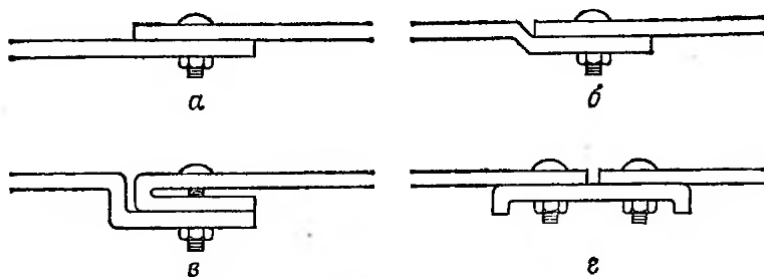


Рисунок 10.5. Тимчасові болтові з'єднання в екрані: а – внапусток, б – внапусток ступінчате, в – внапусток ступінчате із складкою, г – з жолобом.

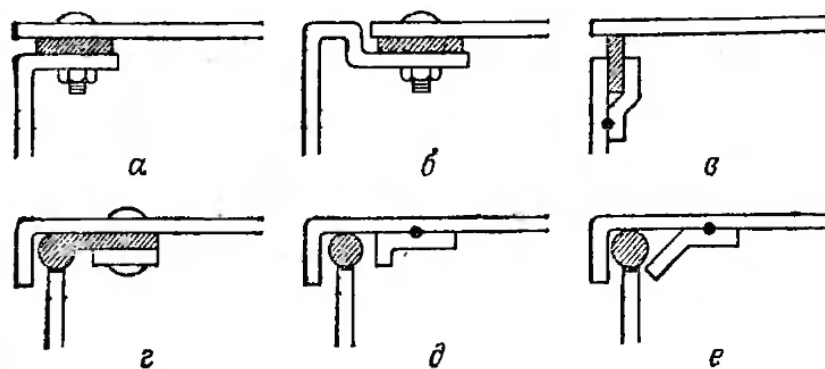
Для зменшення розсіювання в тимчасових з'єднаннях, проміжки заповнюють провідною пастою.

Кришки та екрануючі панелі можуть бути з'ємними. Плоскі кришки, як правило дещо відходять від корпусу, утворюючи щілини з відношенням $H/W \approx 0,002$. Наявність спеціальних піддашків робить кришки жорсткішими і на порядок зменшує відношення H/W крім того застосовують провідні ущільнюючі елементи (прокладка, гумовий сальник) з вмістом графіту, срібла. Щоб кришка не коробилася, її кріплення необхідно починати від середини, рухаючись до кутів.

Перекивання кришки і екрану не менше ніж у 2,5 рази повинно перевищувати товщину кришки.

Схеми, які є джерелами завад, і чутливі схеми необхідно розміщувати подалі від країв кришки; для ущільнення з'єднання кришки з корпусом доцільно користуватися заземлюючими перемичками, металевими стрічковими контактами і провідними прокладками.

Прокладки, сальники використовують для ущільнення погано підігнаних з'єднань. Їх необхідно розміщувати навколо болтів між ділянками екрану, які перекриваються (рис. 10.6), щоб запобігти розсіюванню через отвори під болти.



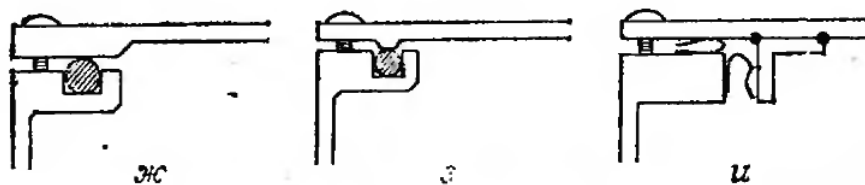


Рисунок 10.6. Ущільнення розбірних з'єднань за допомогою прокладок.

Матеріал провідних прокладок повинен бути еластичним, мати корозійну стійкість, більш виражені катодні властивості порівняно з матеріалом екрану та низький питомий опір.

Товщина прокладки залежить від того, як часто будуть розбирати з'єднання і від максимального зазору між елементами, які стикаються між собою. У нерозбірних з'єднаннях товщина прокладки повинна вдвоє перевищувати цей зазор. Якщо прокладки доводиться знімати і заново встановлювати, то їх товщина повинна в чотири рази перевищувати зазор між елементами.

При екрануванні високочастотної апаратури слід звертати увагу на надійне закриття отворів біля органів керування та індикації.

В екранах необхідно передбачити отвори для прямих і зворотних проводів вхідних і вихідних сигналів, які надходять у систему та виходять з неї, а також для шин живлення. Вентиляційні отвори повинні бути обтягнуті металевою решіткою або сіткою, яку необхідно кріпити до екрану через кожні 100 мм.

Зовнішні з'єднувачі з екраном повинні бути розміщені на відстані, яка перевищує товщину екрану і діаметр контакту не менше, ніж в 10 разів, а внутрішні – в 5 разів. Проводи, які заземлюють екран завжди повинні бути розміщені зовні, поблизу точки введення/виведення сигналу для зведення до мінімуму завад в екрані.

Екран слід під'єднувати до нульової точки схеми. При ненульовому потенціалі екрану конденсатори C_{p1} і C_{p2} (рис. 10.7, а) можуть створити паразитний зв'язок між входом і виходом схеми, викликаючи паразитні коливання. При заземленні екрану (рис. 10.7, б), струм, який виникає відводиться через заземлення, що ефективно розриває коло зворотного зв'язку.

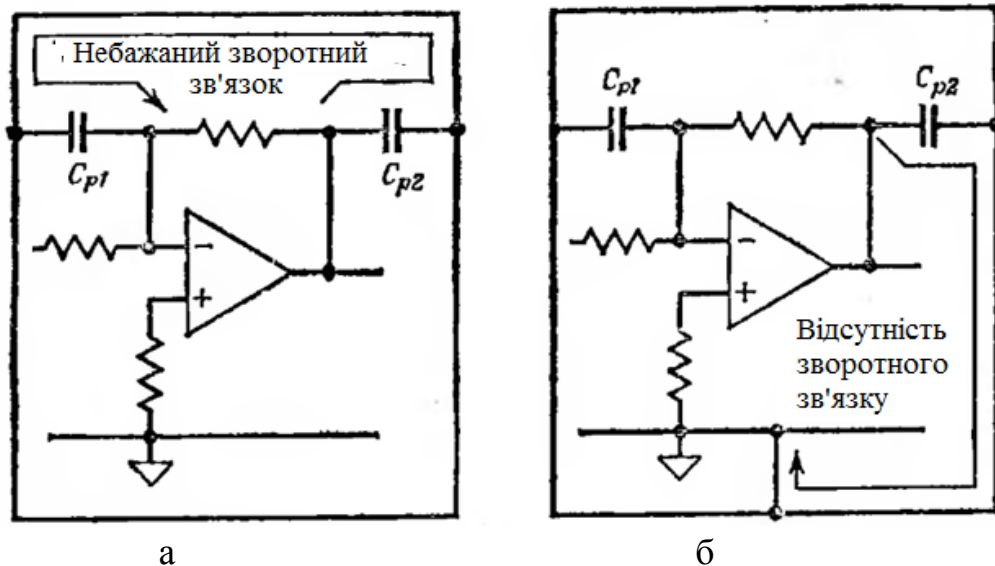


Рисунок 10.7. Паразитний зворотний зв'язок при ненульовому потенціалі екрану: а – екран з «плаваючим» потенціалом; б – екран з'єднаний з нулем системи.

Якщо в системі наявні високі напруги, то для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу, необхідно встановити додатковий екран.

У чутливих схемах може виникнути необхідність з'єднання одного екрану з нульовою точкою, а іншого – з клемми підведення живлення.

10.2 Фільтри

Фільтри, як і екрани, часто використовують у системах для подавлення завад, яких можна було б уникнути при правильному конструюванні. Такі засоби дорогі і можуть підвищити вартість системи в середньому на 10-15%, тоді як таку ж завадостійкість можна забезпечити за допомогою простих методів конструювання, які підвищують вартість системи всього на 1%. Зростання вартості зумовлене тим, що в погано сконструйованих системах виникають сильні завади і при цьому доводиться розміщувати додаткові фільтри на обмежених площах і вирішувати проблеми заземлення.

Якщо засоби фільтрації розглядати як частину конструкції системи, то при її проектуванні необхідно передбачити суцільні заземлюючі шари і якісну розв'язку між входом і виходом, що підвищує ефективність використання простих дешевих фільтрів. При конструюванні друкованих плат дуже важливо передбачити додаткові наскрізні отвори для можливого під'єднання конденсаторів чи/і посадочних місць для встановлення танталових конденсаторів великої ємності та паралельного з ними підключення керамічних конденсаторів з низьким значенням кута діелектричних втрат і котушок індуктивності, оскільки додавання ємності або індуктивності в схему по суті сприяє фільтрації.

Щоб запобігти виникненню паразитних коливань та інших небажаних явищ, завади в сигнальних колах можна придушувати, вводячи в схему конденсатори малої ємності, котушки малої індуктивності та феритові кільця.

Ослаблення завад при фільтрації досягається:

- 1) шунтуванням їх на землю;
- 2) відбиванням назад до джерела;
- 3) розсіюванням (перетворенням енергії завади в теплову).

Перші два способи називають «застосуванням грубої сили», оскільки в цих випадках імпеданси фільтра та джерела не узгоджують. У більшості випадків імпеданси джерела та навантаження є комплексними величинами і залежать від частоти, тому на практиці намагаються забезпечити практично пряме проходження для робочих сигналів і практично розімкнуте або замкнуте на землю коло завад.

На рисунку 10.8 а-д показані фільтри низьких частот, які майже без спотворень пропускають низькочастотні складові сигналу, але ослаблюють високочастотні. Такі фільтри найпоширеніші. У багатьох випадках досить підключити конденсатор малої ємності або котушку індуктивності (рис. 10.8, а та б) поблизу завадостворюючих і чутливих схем.

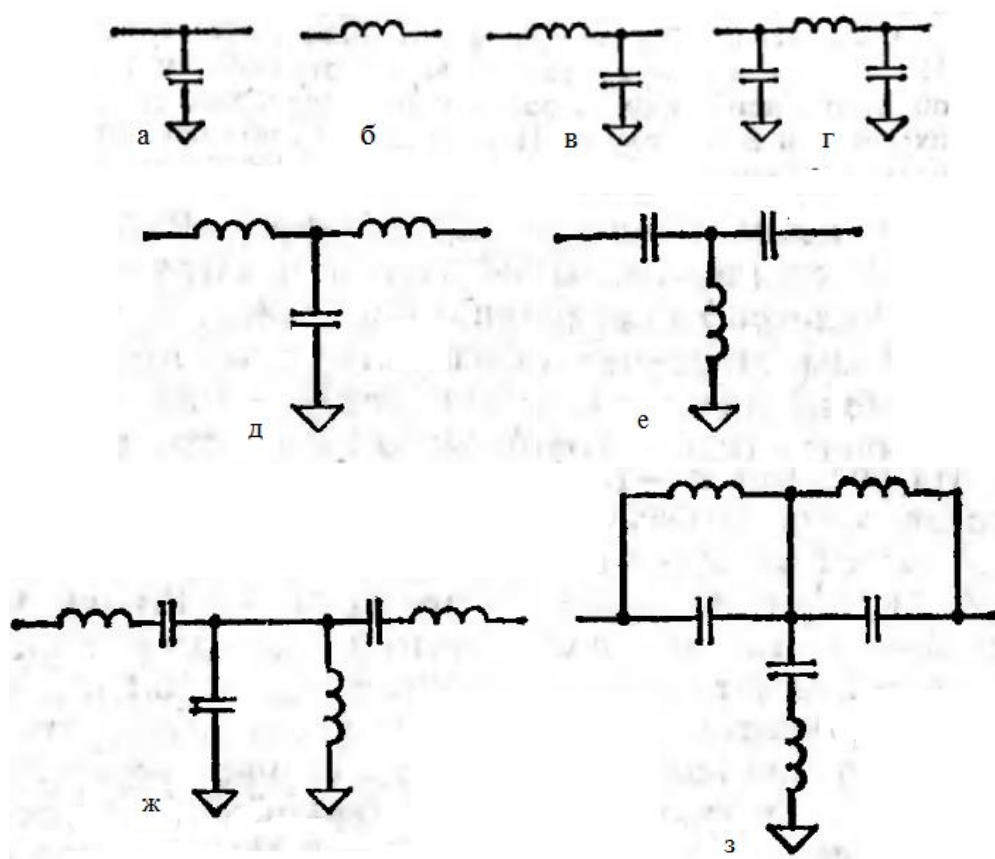


Рисунок 10.8. Дискретні фільтри на реактивних елементах (LC-фільтри) .

Найкращий захист від викидів (стрибків напруги) та інших перехідних процесів забезпечують Т-подібний та Г-подібний фільтри (рис. 10.8, д, г). На рис. 10.8, е подано фільтр високих частот, який ослаблює низькочастотну частину сигналу і пропускає без спотворень (зі зсувом фази) високі частоти. На

рис. 10.8, ж – смуговий фільтр, який пропускає сигнал лише у вузькій смузі частот, і на рис.10.8, е – режекторний фільтр (фільтр-заглушку), який блокує проходження сигналу у вузькій смузі частот.

Оскільки LC-фільтри ослаблюють високочастотні сигнали пропорційно до значення їх частоти, вони можуть бути причиною виникнення стоячих хвиль, а отже і підвищення рівня, завад які випромінюються. Крім того, ці фільтри часто резонують (при резонансі амплітуда завад, може зрости вдвоє, що тільки поглибить проблему) так що сигнали на певних частотах проходять крізь фільтр без ослаблення.

При використанні фільтрів із втратами, які перетворюють енергію паразитних сигналів у тепло, такі проблеми не виникають. Найпростішим способом побудови такого роду фільтра є пропускання провідника крізь феритове кільце (рис. 10.9, а), яке на низьких частотах є хорошим провідником, а на частотах 1–100 МГц його опір дорівнює 50–200 Ом. Кільця з марганцево-цинкових феритів найкраще застосовувати для фільтрації завад частотою до 40 МГц. Кільця з нікель-цинкових феритів з помірною магнітною проникністю найефективніші для подавлення завад на частотах до 200 МГц. А на частотах > 200 МГц найкраще підходять кільця з нікель-цинкових феритів з низькою магнітною проникністю. Імпеданс провідника можна підвищити, збільшивши довжину центральної лінії січення і товщину феритових кілець, розміщуючи вздовж провідника послідовно кілька кілець (рис. 10.9,б) або пропустивши його через кільце кілька разів (рис. 10.9, в).

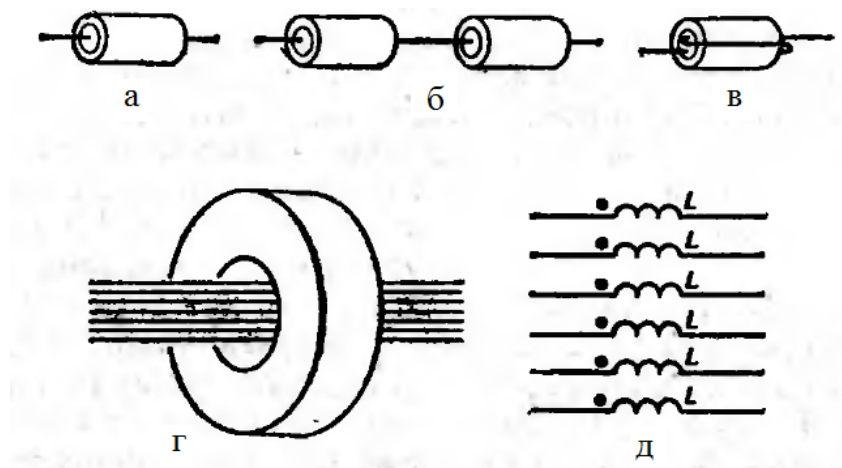


Рисунок 10.9. Феритові осердя і кільця, які використовують як фільтри.

Дуже зручно використовувати феритові кільця з 6-ма отворами:

- для подавлення завад на частотах 0,5 – 1,0 МГц провідник пропускають через феритове кільце таким чином, щоб утворилося 2,5 витка;
- для подавлення завад з частотою 1 – 10 МГц – досить 1,5 витка;
- для подавлення завад >10 МГц провідник пропускають через феритове кільце звичайним способом.

Феритові кільця ефективно придушують і паразитні коливання. Як правило, вони забезпечують задовільне функціонування схеми, поки постійний струм не перевищить 5 А (далі входять в насичення). Проте це граничне значення можна підвищити, якщо в кільці створити невеликі повітряні зазори. Дуже ефективним способом фільтрації є пропускання через феритові кільця всіх силових і сигнальних ліній, підведених до корпусу, і під'єднання до них прохідних конденсаторів. Для подавлення високочастотних завад, які можуть проникати в апаратуру через мережевий шнур (наведення), достатньо один дисковий керамічний конденсатор ємністю 0,01мкФ, під'єднати між проводом з високим потенціалом і корпусом, в інший такий же конденсатор (з короткими виводами) – між нейтральним проводом і корпусом і обмотати силовий шнур навколо феритового стержня діаметром ≈ 13 мм. Якщо високочастотні завади проникають у пристрій через коаксіальний кабель, то його оплетення необхідно з'єднати з нульовою точкою плати.

При частоті завад ≥ 100 МГц можна використати вібратори: пів-хвильові або чверть-хвильові режекторні фільтри (рис. 10.10).

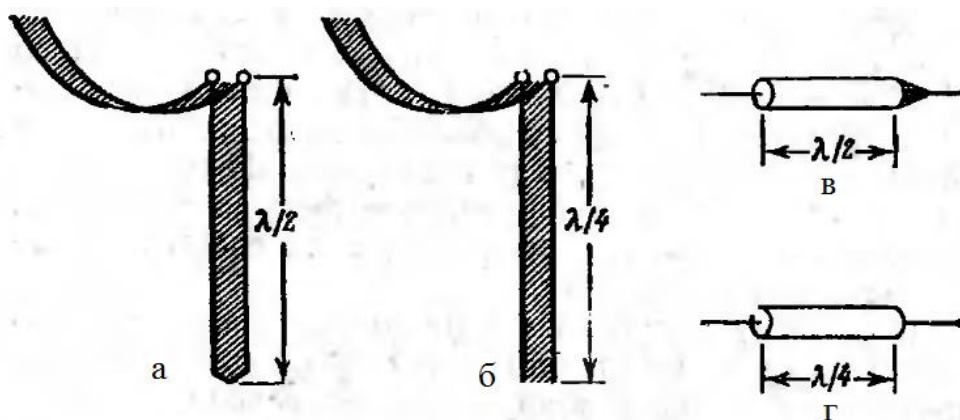


Рисунок 10.10. Резонансні контури схем режекції.

Чверть-хвильовий фільтр являє собою відрізок лінії зв'язку довжиною $\lambda/4$, розімкнений на дистантному кінці (рис. 10.10, б і г), а пів-хвильовий – складається з відрізка лінії зв'язку довжиною $\lambda/2$, закорочений на дистантному кінці (рис. 10.10, а і в).

При конструюванні фільтрів необхідно вибирати компоненти з відповідними номінальними змінними напругою та струмом і робочим діапазоном температур. Правильний вибір компонентів особливо важливий для фільтрів подавлення завад у колах живлення, де конденсатор повинен витримувати високі пульсації струму, а котушки індуктивності повинні бути розраховані на струм, як мінімум вдвічі більший, ніж номінальний струм фільтра і складатися з кількох секцій для зменшення розподіленої ємності і запобігання небажаних резонансів. Довжина виводів усіх компонентів повинна бути мінімальною для зниження рівня завад на високих частотах, які компонент випромінює або під вплив яких потрапляє. При використанні фольгових конденсаторів, зовнішні обкладки заземлюють (краще

використовувати конденсатори з виступаючими обкладками, тоді заземлюють виступаючі краї обкладок). Стандартні фольгові конденсатори застосовують для фільтрації завад частотою ≈ 20 МГц, а слюдяні та керамічні конденсатори ефективні при фільтрації завад частотою до ≈ 200 МГц. Робочі напруги конденсаторів повинні як мінімум вдвічі перевищувати вхідну напругу.

На рисунку 10.11 зображено фільтр короткочасних імпульсних завад для подавлення викидів напруги в шинах цифрових схем.

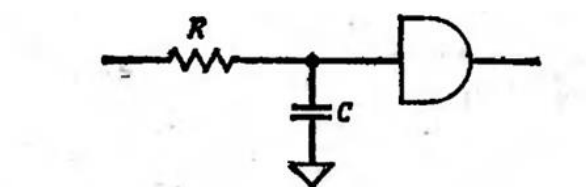


Рисунок 10.11. Фільтр короткочасних імпульсних завад.

Як правило, хороші результати дають фільтри з постійною часу RC-ланки, яка приблизно дорівнює половині значення оберненого до частоти глобальної синхронізації схеми.

Література.

Дж.Барнс Электронное конструирование: способы борьбы с помехами / Пер с англ. В.А.Исаакяна, под ред. д.т.н., проф. Б.Н.Файзулаева –М.: «Мир», 1990, 238 с.

Лекція №11

Пасивні елементи схеми. Характеристика пасивних елементів, електромонтажу, їх частотні характеристики. перехідні процеси та вплив на завадостійкість конструкції, паразитні зв'язки, причини їх виникнення

Як правило, вперше змонтована конструкція РЕА не працює так як того сподівалися. Основні причини цього прояви полевих властивостей радіоелементів (пасивних, реактивних, активних), монтажу (який уявляється “ідеальним”), ліній передач, контактів живлення. Тобто проявляються паразитні індуктивності, ємності, електромагнітні поля, з'являються несподівані зворотні зв'язки.

Отже, вміння розрахувати екрани, розмістити елементи і вузли, розробити монтажні та механічні з'єднання, враховуючи електромагнітні впливи, важливо для конструктора.

Розглянемо електромагнітні характеристики пасивних елементів (які поглинають або накопичують енергію).

Часто при розгляді питань конструювання електронних схем вважають, що резистори, конденсатори і котушки індуктивності є лінійними (рис. 11.1) і їх параметри піддаються строгому опису; імпеданси цих компонентів розраховують за допомогою співвідношень:

Для резистора:
$$Z = \frac{U}{I} = R \text{ (Ом)}.$$

Для конденсаторів з ємністю C :
$$Z = \frac{1}{j2\pi fC} \text{ (Ом)}.$$

Для котушок індуктивності з індуктивністю L :
$$Z = j2\pi fL \text{ (Ом)}.$$

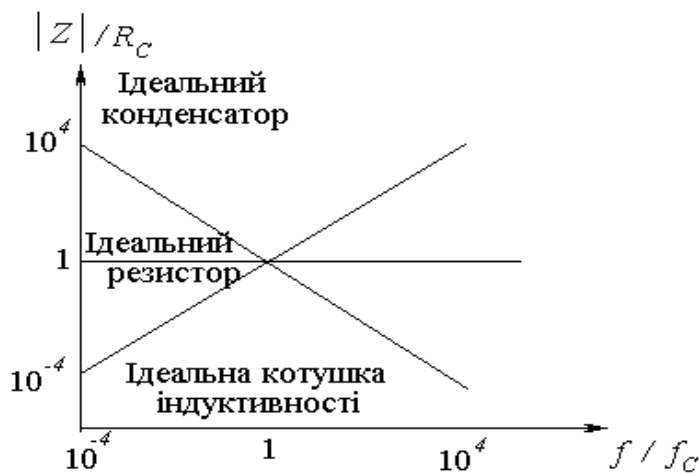


Рисунок 11.1 Залежність імпедансу ідеальних компонентів від частоти

В дійсності ж всі ці компоненти мають паразитний опір, паразитну ємність, паразитну індуктивність. Ці паразитні складові, як правило, практично не проявляються на низьких частотах, проте на високих частотах їх вклад може стати домінуючим.

11.1 Резистори

Резистор не можна розглядати як елемент, який має тільки активний опір, зумовлений його резистивним шаром. Він має також паразитну ємність та індуктивність, розподілені по його довжині. Але, якщо враховувати, що резонансна частота, пов'язана із розподіленими параметрами, набагато вища, ніж робоча, то розподілені параметри можна замінити зосередженими. Тоді еквівалентна схема резистора буде мати вигляд, показаний на рисунку 11.2 (схема заміщення резистора в реальній схемі).

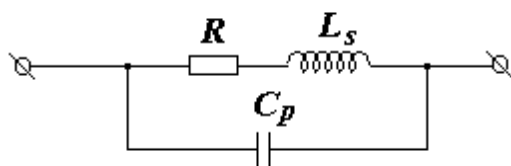


Рисунок 11.2 Модель зосередженого імпедансу для реальних резисторів

Тут R – номінальний опір (Ом); L_S – паразитна послідовна індуктивність (Гн); C_P – паразитна паралельна ємність (Ф).

Під впливом паразитних параметрів на високих частотах опір резистора стає комплексним. Змінюється як величина повного опору резистора, так і величина активної складової. У недротяних резисторах сильніше проявляється вплив ємності, а у дротяних – індуктивності. Індуктивність резистора визначається його розмірами і розмірами виводів. Вона тим більша, чим довший резистор і менший його діаметр. Зазвичай індуктивність резистора

невелика і складає приблизно 3×10^{-9} Гн/см, крім випадків, коли для збільшення опору резистора резистивному шару надають вигляду спіралі й індуктивність може досягати десятих часток мікрогенрі на сантиметр. Індуктивність виводів тим менша, чим вони коротші і товщі.

Резистори, до яких пред'являють вимоги щодо особливо малих значень індуктивності, не мають звичайних дрютяних виводів, а забезпечуються плоскими контактними наконечниками, які безпосередньо впаються у відповідні ділянки схеми. Повна ємність резистора визначається власною ємністю струмопровідного елемента і ємністю між виводами. Ємність струмопровідного елемента залежить від розмірів резистора і діелектричної проникності каркаса. Чим довший резистор, менший його діаметр і чим нижча діелектрична проникність каркаса, тим менша ємність. Ємність між виводами залежить від їхніх розмірів і взаємного розташування. Повна ємність недрютяних резисторів зазвичай дорівнює кільком десятим часток пікофарад.

На частоті f імпеданс резистора має вигляд:

$$Z = \frac{U}{I} = \left[(R + j2\pi f L_s)^{-1} + 2\pi f C_p \right]^{-1} \text{ (Ом)}.$$

На рисунку 11.3 показано типові криві залежності імпедансу реальних резисторів від частоти. Це сімейство кривих має дві особливості: імпеданс високоомних резисторів спочатку не залежить від частоти, а потім зменшується, тоді як імпеданс низькоомних резисторів спочатку не залежить від частоти, потім різко зростає, утворюючи пік, і падає.

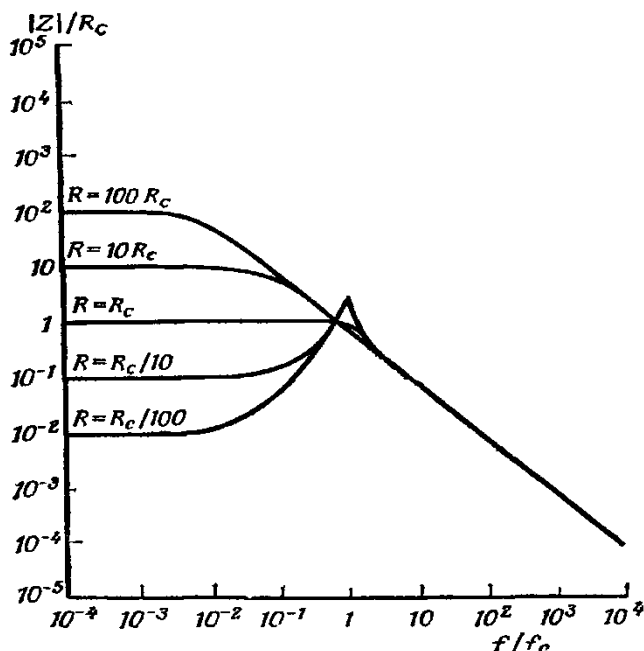


Рисунок 11.3 Імпеданс реальних резисторів

Значення $R_c \approx 1,55 \left(\frac{L_s}{C_p} \right)^{1/2}$ (Ом) є найменшим опором, який не призводить до появи піку на імпедансній кривій, його називають критичним опором резистора. При $R < R_c$ L_s та C_p резонують на частоті $f_c = \frac{1}{2\pi(L_s C_p)^{1/2}}$ (Гц). **Якщо опір резистора $R \geq R_c$, наближені вирази для імпедансу матимуть вигляд:**

$$|Z| \approx R \text{ (Ом) при } f \leq (2\pi R C_p)^{-1} \text{ (Гц)},$$

$$|Z| \approx (2\pi f C_p)^{-1} \text{ (Ом) при } f > (2\pi R C_p)^{-1} \text{ (Гц)}.$$

У таблиці 11.1 наведено значення паразитних складових і власних резонансних частот резисторів, які найчастіше використовуються.

Для запобігання різких змін імпедансу необхідно, щоб частота резонансу набагато перевищувала робочу частоту схеми:

$$f_c \gg f$$

де f_c - резонансна частота резистора

f – робоча частота схеми.

Таблиця 11.1 Параметри резисторів:

Тип резистора	L_s , нГн	C_p , пф	f_c , МГц
Дротяний	47-25000	2-14	8-200
З поверхневим монтажем	0,2-3	0,01-0,08	500-4000
Композиційний	5-30	0,1-1,5	750-2000

Під впливом паразитних параметрів на високих частотах опір резистора стає комплексним. Змінюється як величина повного опору резистора, так і величина активної складової. У недротяних резисторах позначається сильніше вплив ємності, а у дротяних – індуктивності. Індуктивність резистора визначається його розмірами і розмірами виводів. Вона тим більша, чим довший резистор і менший його діаметр. Зазвичай індуктивність резистора невелика і складає приблизно $3 \cdot 10^{-9}$ Гн/см, крім випадків, коли для збільшення опору резистора резистивному шару надають вигляд спіралі й індуктивність може досягати десятих часток мікрогенрі на сантиметр. Індуктивність виводів тим менша, чим вони коротші і товщі. Резистори, до яких пред'являються вимоги особливо малих значень індуктивності, не мають звичайних дротяних

выводів, а забезпечуються плоскими контактними наконечниками, які безпосередньо впаюються у відповідні ділянки схеми. Повна ємність резистора визначається власною ємністю струмопровідного елемента і ємністю між выводами. Ємність струмопровідного елемента залежить від розмірів резистора і діелектричної проникності корпусу. Чим довший резистор, менший його діаметр і чим нижча діелектрична проникність корпусу, тим менша ємність. Ємність між выводами залежить від їхніх розмірів і взаємного розташування. Повна ємність недротяних резисторів зазвичай дорівнює кільком десятим часток пікофарад.

11.2 Конденсатори

Конденсатор має низку паразитних параметрів. До їх числа слід віднести опір втрат, індуктивність, опір ізоляції. При підключенні до конденсатора джерела електричної енергії частина її втрачається у вигляді тепла. Можна вважати, що ця потужність витрачається на опорі втрат. Кількісно величина втрат у конденсаторі оцінюється тангенсом кута втрат δ , що доповнює до 90° кут зсуву фаз між струмом і напругою в ємнісному колі. Тангенс кута втрат можна виразити і як відношення активної потужності втрат конденсатора до його реактивної потужності при синусоїдальній напрузі.

На рисунку 11.4 наведено еквівалентну схему реального конденсатора

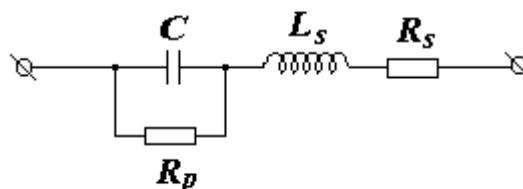


Рисунок 11.4 Модель зосередженого імпедансу для реальних конденсаторів

На рисунку L_s – послідовна паразитна індуктивність виводів; R_s – активний опір виводів; R_p – опір витоку діелектрика; C – номінальна ємність

Повний опір конденсатора на частоті f дорівнює:

Сума активного опору виводів та опору витоку діелектрика складають опір втрат. Втрати у конденсаторі визначаються структурою його діелектрика і різними дефектами діелектрика. Найменші втрати мають вакуумні конденсатори, найбільші – електролітичні. Величина $\tan \delta$ залежить від температури, частоти і прикладеної напруги. При збільшенні частоти і температури втрати зростають.

$$Z = \left(j2\pi fC + \frac{1}{R_p} \right)^{-1} + j2\pi fL_s + R_s \quad (\text{Ом}).$$

Резонансна частота

$$f_c = \frac{1}{2\pi(CL_s)^{1/2}} \quad (\text{Гц}).$$

На рис. 11.5 представлені типові криві залежності імпедансу реальних конденсаторів від частоти. При великих послідовних опорах R_s на кривій імпедансу спостерігається плато поблизу власної резонансної частоти $f_c = 1/[2\pi(CL_s)^{1/2}]$, а при малих послідовних опорах R_s на цій частоті має місце різкий провал.

Проаналізувавши рівняння імпедансу конденсатора, легко зауважити, що найшвидший і найбільш плавний перехід від ємнісної поведінки $f < f_c$ до індуктивної $f > f_c$ відбувається при $R_c = 1,41(L_s/C_p)^{1/2}$ (Ом). Цей опір називають критичним послідовним опором конденсатора.

Якщо послідовний опір конденсатора $R_s \geq R_c$, його імпеданс можна апроксимувати виразами:

$$|Z| \approx (2\pi fC)^{-1} \quad (\text{Ом}) \quad \text{при} \quad f < (2\pi R_s C)^{-1} \quad (\text{Гц}),$$

$$|Z| \approx R_s \quad (\text{Ом}) \quad \text{при} \quad (2\pi R_s C) \leq f \leq (R_s / 2\pi L_s) \quad (\text{Гц}),$$

$$|Z| \approx (2\pi fL_s) \quad (\text{Ом}) \quad \text{при} \quad f > (R_s / 2\pi L_s)^{-1} \quad (\text{Гц}).$$

Якщо $R_s < R_c$, то C і L_s резонують поблизу частоти f_c .

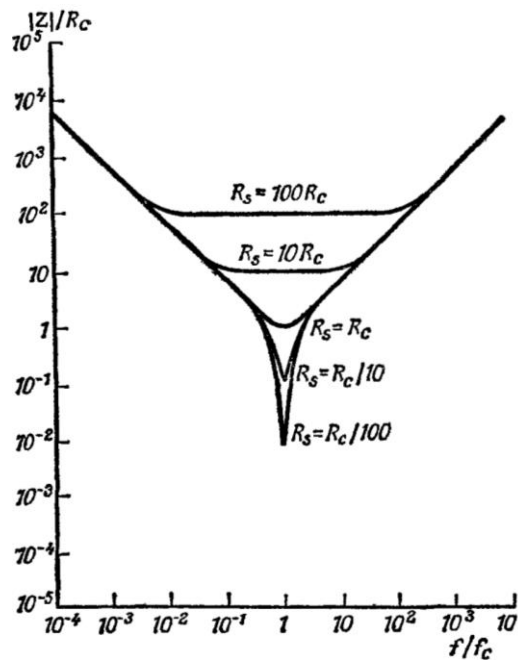


Рис. 11.5 Модель зосередженого імпедансу для реальних конденсаторів

В таблиці 11.2 наведено значення параметрів реальних конденсаторів

Таблиця 11.2 Параметри конденсаторів

Тип	L_S , нГн	R_S , Ом	R_P , Ом	f_C , Гц
Паперовий	6-160	1-16	$\geq 20/C$	2-15
Слюдяний	0,52-25	0,1-47	$\geq 7 \cdot 10^8$	5-7000
Керамічний з поверхневим монтажем	0,06-30	0,005-5	$\geq 1000/C$	2-60000

Запис $\geq 20/C$ – означає питомий опір на 1Ф.

Як правило, резонансна частота конденсатора повинна значно перевищувати робочу частоту схеми. Для конденсаторів з високою ємністю досягти цього досить важко. Одне з простих рішень цього завдання полягає у під'єднанні невеликих високоякісних конденсаторів паралельно до крупних конденсаторів. Такий метод сприяє також компенсації зростання послідовного опору у міру старіння оксидного конденсатора і, тим самим, підтримці ефективності фільтруючої схеми. Для фільтрації надвисокочастотних завад можна скористатися прохідними конденсаторами, що вмонтовуються в екрани для створення необхідної розв'язки між входом і виходом.

11.3 Котушки індуктивності

Котушкою індуктивності називається компонент РЕА, функціонування якого визначається взаємодією електричного струму і магнітного поля. За призначенням котушки індуктивності можна розділити на такі групи:

- котушки коливальних контурів, що визначають частоту настроювання відповідної апаратури;
- котушки, що забезпечують певну смугу пропускання;
- котушки зв'язку, що передають електромагнітну енергію від одних елементів схеми до інших;
- дроселі високої і низької частоти, що являють собою високий опір для струмів відповідних частот.

За конструкцією котушки можна розділити на безкаркасні, одношарові та багатошарові; з магнітним осердям і без осердя; екрановані та неекрановані. Котушки можуть виготовлятися з постійним та змінним значенням індуктивності. Котушки індуктивності не стандартизовані і розробляються для кожного конкретного випадку. Це пояснюється тим, що розробити котушки універсального призначення не вдається. Для конкретних умов застосування доводиться створювати конструкції, які кращим чином задовольняють заданим вимогам.

У котушках індуктивності, окрім основного ефекту взаємодії струму і магнітного поля, спостерігаються й додаткові паразитні ефекти. Тому котушка має низку паразитних параметрів. Зокрема, власну ємність, індуктивність виводів, ємність, зумовлену наявністю осердя, ємність обмотки, ємність між выводами й корпусом, опір втрат в ємностях. Проте у багатьох випадках можна об'єднати різні складові ємності котушки в одну еквівалентну ємність із відповідними втратами, а індуктивності виводів розглядати як частину індуктивності котушки. Тоді еквівалентна схема, яка враховує основні та паразитні параметри, буде мати вигляд, зображений на рис.11.6.

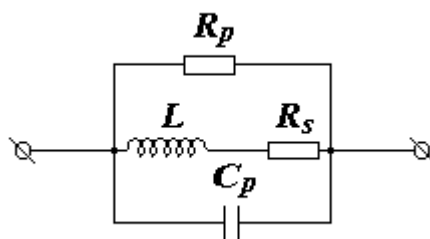


Рисунок 11.6 Модель зосередженого імпедансу для реальної котушки індуктивності

На цій схемі R_p – сума опорів витoku і осердя; R_s – опір витків; C_p – паразитна ємність, зумовлена зовнішніми виводами котушки і її конструктивними особливостями; L – номінальна індуктивність.

При частоті f імпеданс котушки індуктивності обчислюють за формулою:

$$Z = \left((j2\pi fL + R_s)^{-1} + \frac{1}{R_p} + j2\pi fC_p \right)^{-1} \text{ (Ом);}$$

резонансна частота:

$$f_c = \frac{1}{2\pi(LC_p)^{1/2}} \text{ (Гц).}$$

Сімейство типових кривих залежності імпедансу реальних котушок індуктивності від частоти наведене на рис. 11.7. Вони схожі з кривими імпедансу для низькоомних резисторів на рис. 11.5.

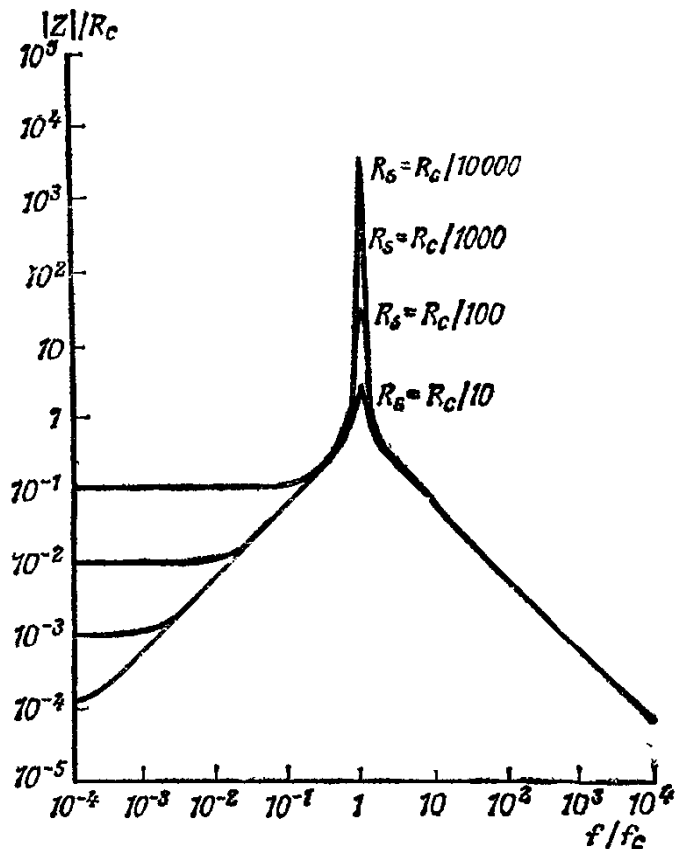


Рисунок 11.7 Імпеданс реальних котушок індуктивності

11.4 Трансформатори

Трансформатор -- це компонент РЕА, який має дві або більше обмоток і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї

або декількох систем змінного струму в одну або кілька інших систем змінного струму.

Основними параметрами трансформатора є індуктивність первинної обмотки і коефіцієнт трансформації. Частина магнітного потоку первинної обмотки замикається через вторинну обмотку, що визначає індуктивність L_1 , а частина розсіюється, що визначає індуктивність розсіювання L_{s1} . У правильно сконструйованому трансформаторі, магнітний потік розсіювання у багато разів менший, ніж основний потік, який пронизує обидві обмотки, тобто $L_{s1} \ll L_1$. Протікання струму у вторинному колі відбувається за рахунок енергії, що надходить з первинного кола. Його вплив можна відобразити індуктивністю розсіювання у вторинному колі L_{s2} . Як у первинній, так і у вторинній обмотці є втрати, зумовлені активним опором проводу. У багатьох випадках необхідно враховувати власну ємність C_0 обмоток трансформатора.

Використовуючи поняття наведених опорів і струмів, наявність вторинної обмотки та її вплив можна відобразити, як це зображено на еквівалентній схемі трансформатора (рис. 11.8).

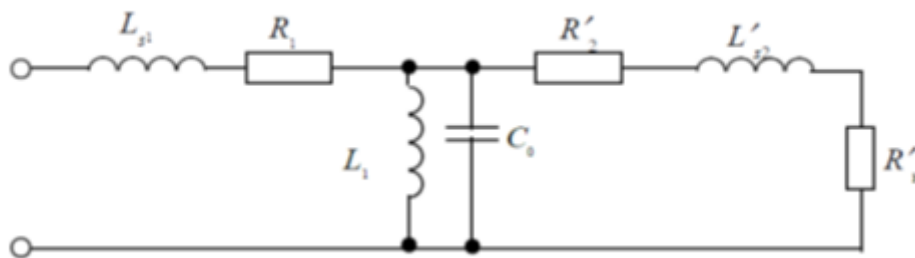


Рисунок 11.8 Еквівалентна схема трансформатора

На рисунку 11.9 показано типи перехідних процесів, спостережуваних у трансформаторах, більшість з яких обумовлені ємністю між обмотками. У стандартних трансформаторів ця ємність лежить в межах $10 \text{ пФ} < C_m < 50 \text{ пФ}$, тоді як у трансформаторів з розділеним каркасом обмотки (рис.11.10, а) C_m зменшується до $\approx 5 \text{ пФ}$, а екранування трансформаторів електростатичними екранами навколо обмоток може ще більш знизити C_m (до $\approx 0,001 \text{ пФ}$) при відповідному закладенні виводів і під'єднуванні екранів

Ряд проблем пов'язаний з сердечником трансформатора. Для досягнення максимальної ефективності трансформатори часто працюють в режимі, близькому до насичення сердечника. Проте при насиченні сердечника в трансформаторі виникають викиди напруги і генеруються гармоніки вихідної напруги..

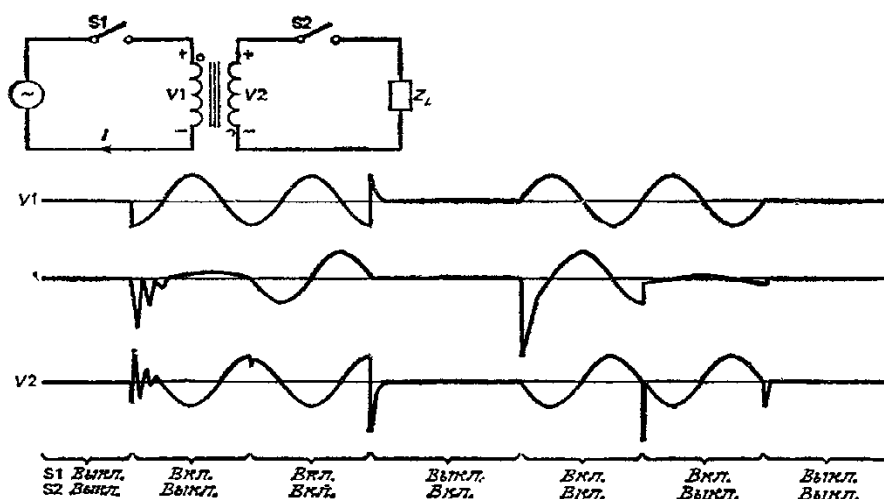


Рисунок 11.9 Перехідні процеси в трансформаторах

Для подолання цих труднощів доводиться застосовувати трансформатори, сердечники яких мають високу магнітну проникність (рис.11.10).

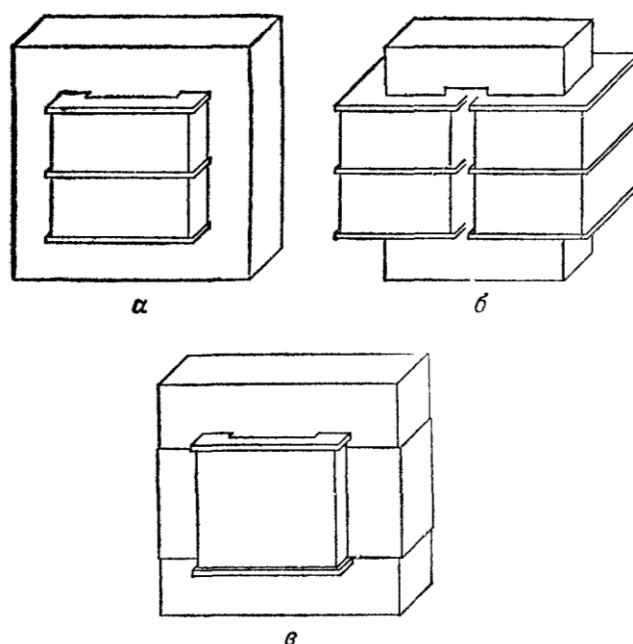


Рисунок 11.10 Способи зменшення завад в трансформаторах: а-розділений каркас обмотки (двосекційна обмотка); б-двосекційні обмотки на О-подібному сердечнику; в-трансформатор з намотаним кругом нього короткозамкнутим кільцем

Проте і тороїдальні трансформатори не є панацеєю. Через високу магнітну ефективність в них спостерігається тенденція до сильних викидів струму у момент включення, які можуть перевищувати стаціонарний струм в 15 разів. Щоб уникнути таких викидів струму слід відійти від режиму насичення сердечника. Можна, наприклад, розрізати сердечником навпіл і потім склеїти, ввівши тим самим два невеликі повітряні зазори в магнітне коло. Основний недолік такого способу полягає в невеликому зростанні втрат

в сердечнику. Щоб уникнути насичення сердечника і, в той же час, підтримувати на низькому рівні втрати в ньому, ряд фірм пропонує сердечники, що складаються з двох компонентів: із зазором і без зазору. Інша можливість — використовувати трансформатор з двосекційними обмотками на О-подібному сердечнику (рис. 11.10, 6) з розділеними каркасами, що знижують ємність між обмотками та підвищують індуктивність розсіяння для придушення перехідних процесів і фільтрації завад.

11.5 Електромагнітні характеристики електричного монтажу

Досвід роботи з розробки РЕА показує, що у $\sim 90\%$ часу затрачається на виявлення помилок монтажу. Низькочастотний фон, самозбудження, генерація паразитних коливань, електромагнітне випромінювання, нагромадження і вплив електростатичних зарядів — прояви неправильного монтажу. Їх можна уникнути якщо одразу ж вважати монтаж частиною схеми.

У загальному випадку проводи можна розглядати як нескінченну кількість послідовно з'єднаних ланок (рис. 11.11, 11.12).



Рисунок 11.11 Модель зосередженого імпедансу проводу довжиною l :

C_p – паразитна ємність між двома провідниками;

L_s – власна індуктивність ділянки провідника;

U_s – наведена різниця потенціалів від інших провідників;

R_s – опір провідника.

Однією з різновидностей є „довгий” провідник (довга лінія).

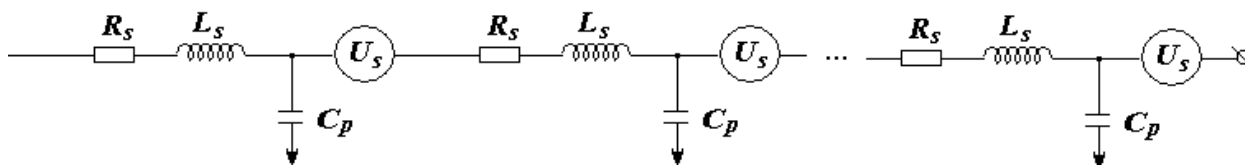


Рисунок 11.12 “Довгий” провідник

“Довгий” провідник розглядають як “довгу” лінію з розподіленими по довжині параметрами, по якій сигнал поширюється із затримкою та спотворенням різними для різних частот. Якщо l провідника $> \lambda/8$, то він є антеною (приймає або випромінює електромагнітні коливання). Якщо відстань між заземленнями більша за $0,1\lambda$, то в середовищі конструкції виникають стоячі електромагнітні хвилі. Механічні вібрації провідників викликають турбоелектричні ефекти. У місцях контактів виникають термoeфекти (явище Зеебека), виникають також гальванічні ефекти. Контакт залізо-мідь — класичний приклад джерела гальванічного потенціалу.

Лекція №12

Активні елементи схеми. Характеристика активних компонентів, електромонтажу, їх частотні характеристики. перехідні процеси та вплив на завадостійкість конструкції, паразитні зв'язки, причини їх виникнення

Активні елементи є такими, що здатні створювати завади (в т.ч. електромагнітні) та піддаватися їх впливу зокрема як ланки кіл паразитного зв'язку. У більшості випадків сигнали, що створюються активними елементами, мають різкі наростаючі і спадаючі фронти (чим в більшій мірі форма сигналу може бути апроксимованою імпульсами прямокутної форми, тим вища верхня частота завад, що генеруються, та ширший їх діапазон), в більшості схемотехнічних рішень діапазон завад локалізується у смузі частот 10—300 МГц. Деякі активні елементи на частотах 0,1—20 МГц можуть почати генерувати паразитні коливання, що пов'язані з наявністю паразитних ємностей між входом і виходом (паразитний додатний зворотний зв'язок). Ці паразитні ємності можуть також з'явитися причиною взаємодії робочих сигналів, які вважаються ізольованими один від одного. Нарешті, нелінійні прилади можуть випрямляти високочастотні сигнали, генеруючи вищі гармоніки та інші завади.

Простими нелінійними приладами є діоди і випрямлячі дія яких заснована на використанні властивостей речовин, що займають за електропровідністю проміжне положення між провідниками і діелектриками. Характерною особливістю напівпровідників є підвищення їх електропровідності (електронної чи діркової) при введенні домішок, а також при зміні температури. В якості речовин, що використовуються для виготовлення напівпровідникових приладів, широко використовуються: Ge – германій, Si – кремній, GaAs – арсенід галію, GaP – фосфід галію, SiC – карбід кремнію і ряд інших.

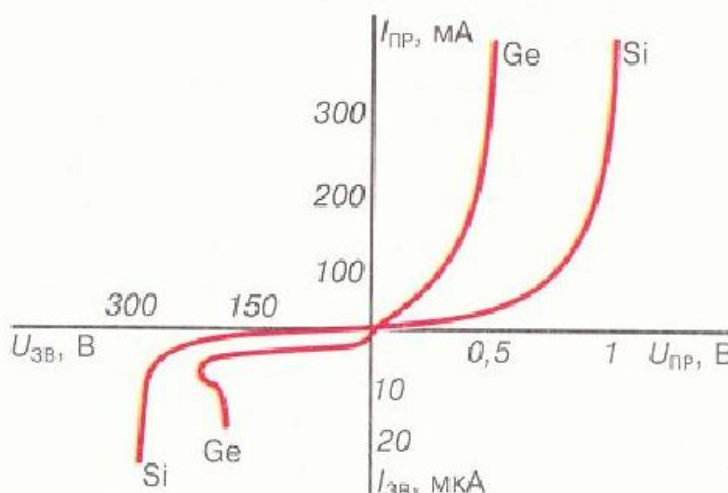


Рисунок 12.1 Вольт-амперні характеристики кремнієвого та германієвого діодів

Електронно-дірковий перехід при зворотній напрузі $U_{зв}$ аналогічний конденсатору із порівняно значним струмом витоку в діелектрику. Запираючий шар має великий опір і відіграє роль діелектрика, а по обидві сторони р-п-переходу розташовані два різнойменних об'ємних заряди, створені іонізованими атомами донорної і акцепторної домішок, що поглиблюються під впливом зворотної напруги. Тому р-п-перехід має ємність, подібно до конденсатора з двома обкладками. Цю ємність називають бар'єрною C_b . Особливість бар'єрної ємності полягає у тому, що вона нелінійна, тобто змінюється при зміні напруги на переході. Якщо зворотна напруга зростає, то товщина запираючого шару збільшується і ємність C_b зменшується. Характер цієї залежності показано на рис. 12.2.

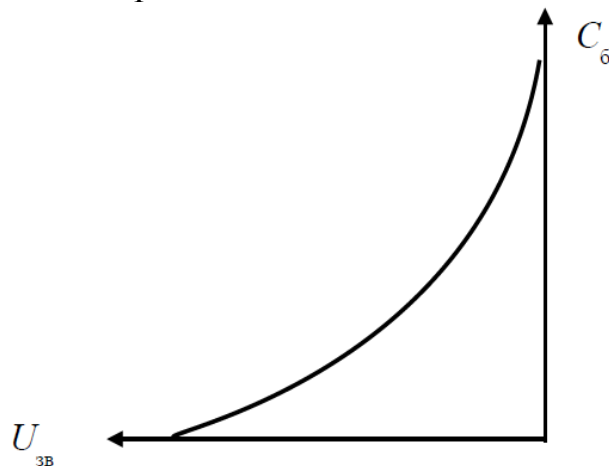


Рисунок 12.2. Залежність бар'єрної ємності від зворотної напруги

Бар'єрна ємність шкідливо впливає на випрямлення змінного струму, так як шунтує діод і через неї на більш високих частотах проходить змінний струм. Однак, бар'єрна ємність буває і корисною. Спеціальні діоди (варикапи і варактори) використовують в якості конденсаторів змінної ємності для налаштування коливальних контурів, в параметричних підсилювачах, а також у схемах, робота яких базується на властивостях нелінійної ємності.

При прямій напрузі $U_{пр}$ діод, крім бар'єрної ємності, має також дифузійну ємність $C_{диф}$, яка також нелінійна і зростає при збільшенні прямої напруги $U_{пр}$. Дифузійна ємність характеризує накопичення рухомих носіїв заряду в р- і п-областях. Дифузійна ємність значно більша, ніж бар'єрна. З урахуванням ємностей можна скласти еквівалентну схему діода, яку наведено на рис. 12.3.

У моделі на рис. 12.3: R_0 являє собою сумарний, порівняно невеликий опір р- і п-областей і контактів цих областей з виводами; $R_{нл}$ – нелінійний опір, який при прямій напрузі дорівнює $R_{пр}$, (невеликий), а при зворотній напрузі дорівнює $R_{зв}$ (дуже великий); L_v – індуктивність виводів, C_v – паразитна ємність між виводами.

Наведена модель для аналізу різних схем може бути спрощена. На НВЧ необхідно враховувати індуктивність L_v і ємність C_v .

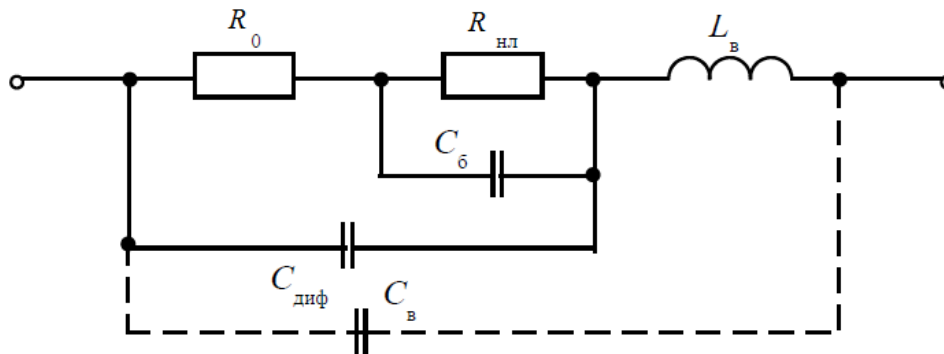


Рисунок 12.3. Модель напівпровідникового діода

Уведення домішок у напівпровідник суттєво змінює його провідність. Якщо увести у чотиривалентний напівпровідник п'ятивалентну домішку, отримаємо донорну провідність (n-типу), так як донор віддає свої електрони. Якщо увести тривалентну домішку, отримаємо акцепторну провідність (р-типу), так як акцептор захоплює електрони з решітки основного кристала, створюючи діркову провідність. Таким чином, у напівпровіднику n-типу основними носіями заряду є електрони, а дірки – неосновними. У напівпровіднику р-типу основними носіями заряду є дірки, а електрони – неосновними.

Під дією електричного поля, тепла, світла, іонізуючого випромінювання та інших факторів відбувається генерація пар носіїв заряду, тобто виникають пари електрон – дірка. Внаслідок того, що електрони і дірки здійснюють хаотичний тепловий рух, відбувається зворотний процес, пара електрон – дірка зникає. Таке зникнення пар носіїв називається рекомбінацією носіїв заряду. У напівпровідникових приладах можуть протікати дрейфовий і дифузійний струми. Дрейфовим називається струм, зумовлений електричним полем. Якщо до напівпровідника прикласти зовнішнє електричне поле, то в ньому спостерігається спрямований рух дірок уздовж поля і спрямований рух електронів у протилежному напрямку. Дифузійний струм зумовлений переміщенням носіїв заряду з області з високою концентрацією в область з більш низькою концентрацією.

Електронно-дірковим (р-n) називається такий перехід, який утворений двома областями напівпровідника з різними типами провідності. Електронно-діркові переходи використовуються у більшості напівпровідникових приладів. У діодах і польових транзисторах використовують один р-n-перехід, у біполярних транзисторах – два р-n-переходи, у тиристорах – три і більше р-n-переходів. Тому дуже важливим є розуміння фізичних явищ і електричних властивостей р-n-переходу.

При зворотному зсуві діода р-n-перехід збіднений носіями заряду, проте паразитна ємність все ж таки може створити в приладі високочастотні завади.

Якщо тепер різко подати на діод прямий зсув, його імпеданс протягом декількох наносекунд залишатиметься високим і створить невеликий пік прямої напруги (V на рис.12.4). Потім, якщо на діод знов різко подати зворотний зсув, починається розсмоктування заряду в області переходу і відновлення зворотного струму приладу. При цьому протягом доль секунди діод працює в режимі короткого замикання, викликаючи сильний викид зворотного струму відновлення (I на рис.12.4).

Наприклад якщо через звичайний випрямляч тече струм 0,5 А, те при його виключенні викид зворотного струму відновлення може досягати 1,75 А і тривати 40 мкс. Для зменшення таких викидів можна скористатися високовольтними діодами або використовувати імпульсні діоди з малим часом відновлення. Діоди Шоткі на гарячих носіях (струм тече через діод Шоткі внаслідок того, що під впливом прямої напруги зміщення р-п-переходу електрони в металі долають потенціальний бар'єр. Тому діоди Шоткі називаються також діодами з «гарячими» носіями заряду) на відміну від звичайних діодів не накопичують заряд, проте їх висока паразитна ємність створює аналогічні ефекти.

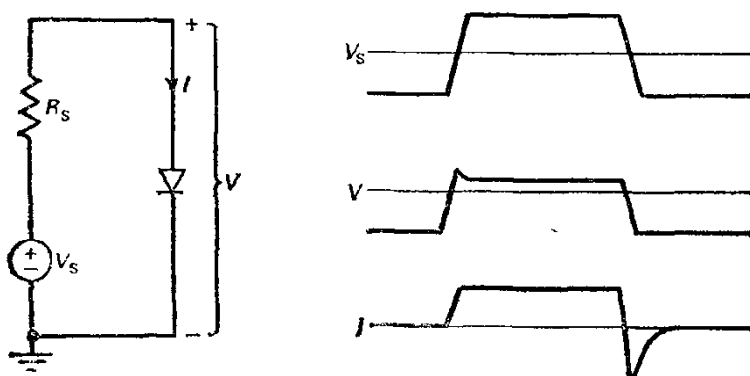


Рисунок 12.4 Вплив накопичених зарядів на характеристики діода у відкритому і закритому станах

Паразитна ємність стабілітронів зазвичай складає 10—7000 пФ, що оберігає від дуже коротких викидів. Поблизу зламу вольт-амперної характеристики в області пробою у більшості стабілітронів спостерігається ділянка негативного опору, в якому може генеруватися білий шум з амплітудою 1—1000 мкВ. Такий тип завад особливо помітний в сплавних стабілітронах. Для їх зменшення замість сплавних стабілітронів можна застосовувати дифузійні; ослабити вплив завад можна також, вибираючи режим роботи далеко від зламу вольт-амперної характеристики в області пробою або шунтуючи стабілітрон невеликим керамічним конденсатором.

Тиристори можуть генерувати сильні викиди напруги в колі змінного струму, оскільки вони швидко спрацьовують і зазвичай перемикають великі струми. Подібний викид потенціалу на аноді, частина якого через внутрішню паразитну ємність подається на керуючий електрод, може призвести до несанкціонованого увімкнення («замикання») тиристорів. Зменшити

вірогідність такого помилкового спрацьовування можуть спеціальні схеми, які запускають тиристори при мінімальному струмі навантаження, і згладжуючі RC ланки, які сприяють плавному наростанню струму на аноді.

Усі проблеми, характерні для напівпровідникових діодів, властиві і для переходу база — емітер біполярних транзисторів. Додатково паразитні ємності між базою, емітером і колектором можуть викликати паразитну генерацію високочастотних транзисторів ($f_t \geq 100$ МГц) на частоті $\leq 0,2f_t$.

У загальному випадку при створенні схем доцільно застосовувати транзистори з мінімально можливою швидкодією. Нарешті, переходи база — емітер і база — колектор можуть випрямляти високочастотні завади, змінюючи зсув робочої точки транзистора. Останній факт може понизити коефіцієнт підсилення транзистора або, навпаки, відкрити транзистор, який вважається закритим.

Паразитна ємність може стати причиною паразитного зв'язку між витком, затвором і стоком польових транзисторів, причому в схемах з високим імпедансом ці проникаючі завади можуть перевищувати робочі сигнали. Паразитна ємність може також призвести до паразитних коливань в польовому транзисторі. Запобігти таким коливанням може невеликий (100 Ом — 2 кОм) резистор, у колі ланцюги затвора або феритове кільце на його виводі.

Численні чинники сприяють виникненню завад і в електровакуумних приладах. Вони можуть генерувати паразитні коливання, сприймати розсіяні електромагнітні поля і фон від нагрівачів, що працюють на змінному струмі, в них можливе виникнення мікрофонних ефектів в результаті ударів або вібрацій і струмів витоку між катодом, сіткою, анодом і іншими елементами.

Паразитна ємність знижує швидкість операційних підсилювачів (ОП) і обмежує максимальну швидкість наростання вихідної напруги, а також може призвести до паразитної генерації або насичення. Більшість ОП генерують коливання на частотах 0,5—4 МГц, якщо на виході включене реактивне навантаження.

Цифрові інтегральні схеми (ІС) формують трапецеїдальні імпульси з різко наростаючим і спадаючим фронтом (рис.12.5). Завади, які створюються пропорційні добутку амплітуди сигналу і частоти, тому f_2 є наближеною верхньою частотною межею завад, які створює трапецеїдальні імпульси.

Кожен раз при змінах стану на виході цифрових ІС в шинах живлення і заземлення виникають різкі викиди струму. При високих навантаженнях їх амплітуда зростає до $\approx I_{os}$ (А) — величини струму зворотного зв'язку а тривалість складає $CL(|V_f - V_i|)/I_{os}$, а при малих навантаженнях ці викиди досягають $\approx I_{os}/2$ (А) і тривають t_r (с) — тривалість наростаючого фронту.

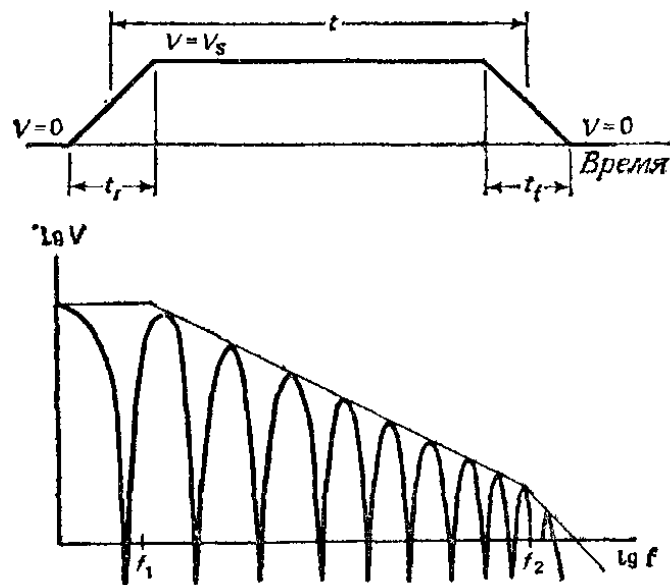


Рисунок 12.5. Частотний спектр трапецеїдального імпульсу

У цифрових ІС також можуть виникнути паразитні коливання на частотах 5—50 МГц, якщо кола живлення погано шунтовані або вхідні сигнали змінюються дуже повільно (рис. 12.6).

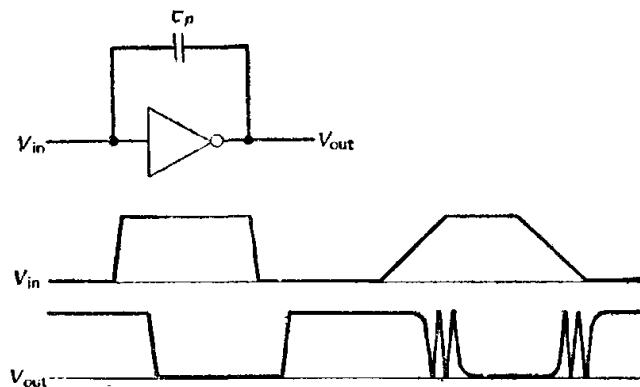


Рисунок 12.6 Паразитні коливання в ІС які виникають через наявність паразитної ємності і пологих фронтів вхідних імпульсів

Лекція №13

Аналогові та цифрові схеми. Характеристика аналогових і цифрових схем з точки зору завадостійкості. Методи подавлення завад. Методи проектування схем спряження, вибір компонентів

13.1 Аналогові схеми

Більшість аналогових схем оперують слабкими сигналами, тому вони дуже чутливі до завад. При розробці аналогових схем, призначених для роботи в лінійному режимі, необхідно забезпечувати мінімальний коефіцієнт підсилення і мінімальні робочу смугу частот. Чутливість до завад можна знизити, підтримуючи імпеданс схеми на виході нижче 1 кОм, а імпеданс навантаження - вище 300 Ом. Підсилювачі з високим коефіцієнтом підсилення, як правило, генерують паразитні коливання на частотах 10 кГц – 5 МГц, тому при проектуванні кіл зворотного зв'язку необхідно передбачати подавлення цих коливань, беручи до уваги найгірший випадок.

Якщо в аналоговій схемі виникає завада високого рівня, то вона може змінити зміщення робочої точки і тим самим або знизити чутливість підсилювача, або призвести до його перевантаження.

В аналогових схемах необхідно здійснювати ефективне шунтування і монтаж для обмеження їх чутливості до завад, які можуть до них потрапити через шини живлення.

На рисунку 13.1 показано рекомендовану схему шунтування кіл живлення ОП. Кожна шина живлення $+V$ і $-V$ повинна мати один шунтуючий танталовий оксидний конденсатор ємністю 1-10 мкф для кожних п'яти ОП, що входять у схему. У свою чергу кожен ОП повинен бути оснащеним керамічними шунтуючими конденсаторами, які з'єднують його виводи з лінією зворотного струму вихідного сигналу. Ці конденсатори повинні мати ємність 0,1 мкф або принаймні у 100 разів перевищувати ємність навантаження. Недостатньо ефективне шунтування часто призводить до паразитних коливань.

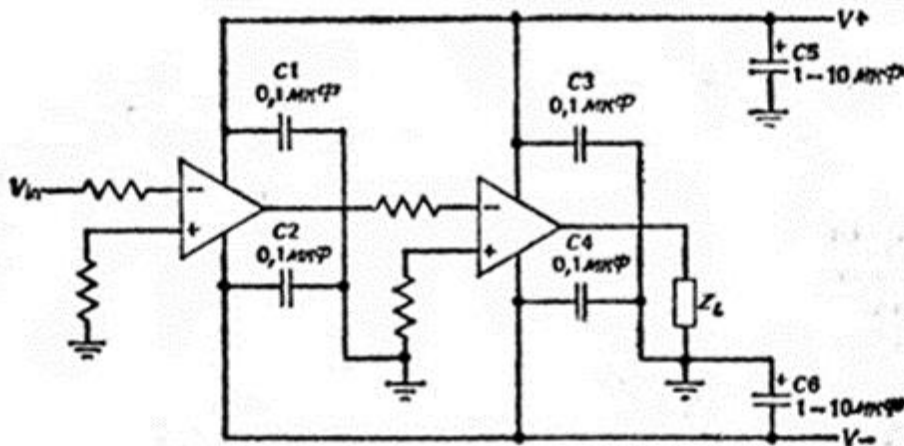
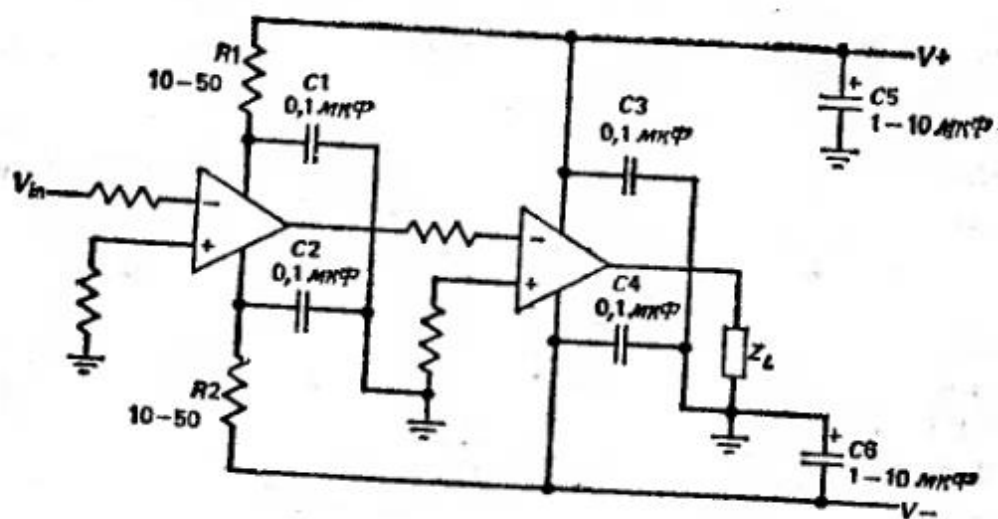


Рисунок 13.1. Рекомендована схема шунтування ОП

Якщо в схемі конденсатори великої та малої ємності з'єднані паралельно, то може виникнути необхідність під'єднання до конденсатора великої ємності додаткового резистора з опором $R \approx 1$ Ом для подавлення височастотних перехідних процесів.

На рисунку 13.2 показано рекомендований монтаж для багатокаскадних підсилювачів. Резистори R_1 та R_2 підвищують завадостійкість кола живлення першого каскаду. Входи джерела живлення повинні знаходитися у безпосередній близькості від вихідного каскаду для зменшення рівня завад у колах живлення першого каскаду і, тим самим, знизити ризик виникнення паразитних коливань.



13.2 Рекомендована схема розв'язки для багатокаскадних підсилювачів

В ідеальній схемі розміщення багатокаскадного підсилювача вхідний та вихідний каскади необхідно розміщувати якомога далі один від одного.

Якщо на виході ОП знаходиться реактивне навантаження (наприклад, L_L , C_L на рис.13.3), то в ньому виникнуть паразитні коливання. Подолати їх можна послідовним підключенням невеликого гасячого резистора (рис. 13.3, а) опором $R_L \geq 2(L_L / C_L)^{1/2}$ (Ом) або встановленням на вихідний вивід феритового кільця (рис. 13.3, б).

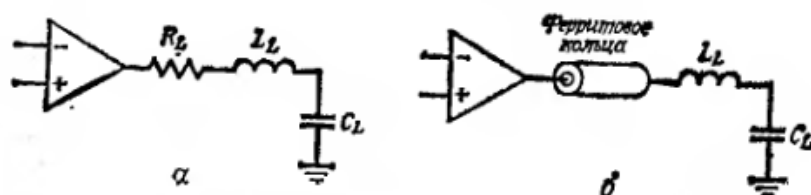


Рисунок 13.3. Підключення до операційного підсилювача реактивного навантаження

Паразитні коливання операційного підсилювача можуть виникнути і в тому випадку, коли на виході у них є ємнісне навантаження. На рисунку 13.4 показано два способи усунення таких коливань у інвертуючих підсилювачах.

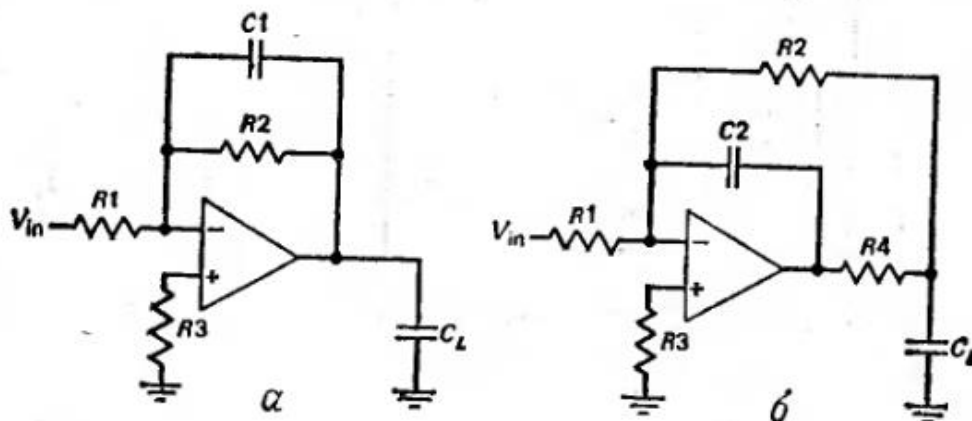


Рисунок 13.4. Підключення до інвертуючого ОП ємнісного навантаження

Резистори R_1, R_2 задають коефіцієнт підсилення підсилювача, а резистор R_3 не є обов'язковим, хоча, якщо $R_3 \approx R_1$, то він сприяє компенсації термоелектричної напруги, яка виникає у вхідному колі. Додавання конденсатора C_1 (рис. 13.4, а) з ємністю $C_1 \geq 15(R_1/R_2)$ (пФ), дає змогу зберегти стійкий режим роботи майже при будь-яких навантаженнях.

На рис.13.4, б у схему добавлені резистор і конденсатор. Резистор R_4 , опір якого набагато перевищує вихідний опір ОП, та конденсатор $C_2 \geq C_L(R_4/R_2)$ (пФ) стабілізують режим роботи ОП при всіх навантаженнях.

На рисунку 13.5 показано чотири способи запобігання паразитним коливанням у неінвертуючих ОП.

На рис 13.5,а компоненти R_5 і C_3 сповільнюють надходження вхідного сигналу для того, щоб заряд конденсатора C_L не входив у стан насичення.

На рис 13.5,б компоненти R_6 і C_4 зменшують коефіцієнт підсилення ОП на високих частотах, не змінюючи цей параметр при постійному струмі.

На рисунку 13.5,в резистор R_7 і конденсатор $C_5 \geq C_p$ (де C_p - паразитна ємність вузла) перетворюють ОП у стійку інтегруючу схему.

На рисунку 13.5,г конденсатор C_6 створює ємнісний подільник, паралельний резистивному подільнику R_1 і R_2 у колі зворотного зв'язку. Хороший метод, для того, щоб перевірити ОП на стійкість полягає в тому, щоб під'єднати на його вхід генератор імпульсів і налагодити його

таким чином, щоб створити на виході підсилювача сходинки напруги величиною 200мВ. Якщо викид на виході не перевищує 40%, то схему можна вважати стійкою.

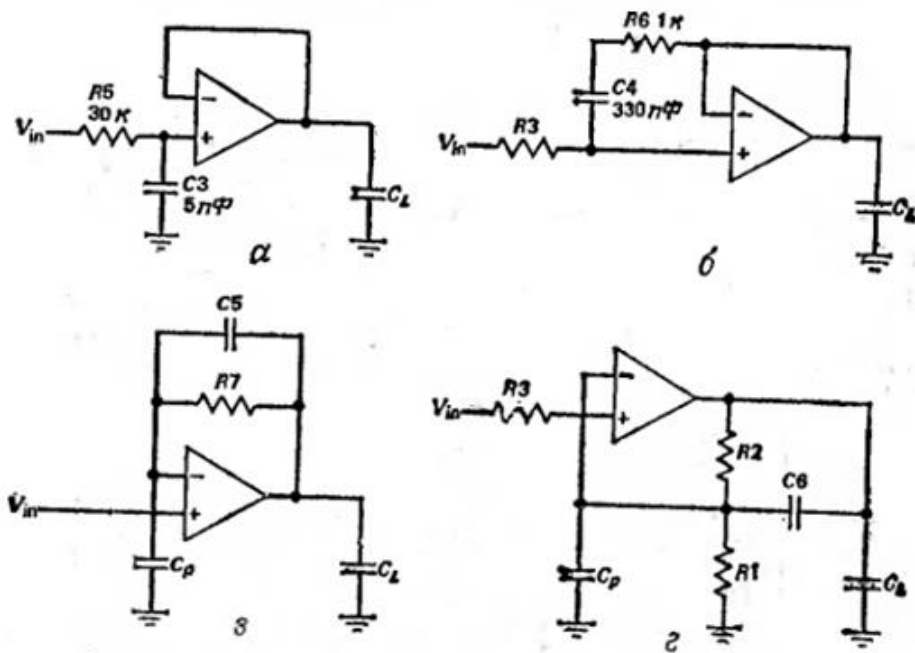


Рисунок 13.5. Підключення до неінвертуючого ОП ємнісного навантаження

На вхід аналогових ІС можна подавати сигнали від різних джерел, на входах по змінному струму необхідно встановлювати резистори R_1 і R_2 (рис. 13.6,а), які запобігають заряджанню конденсатора на вході і, тим самим, сприяють уникненню різних шумів.

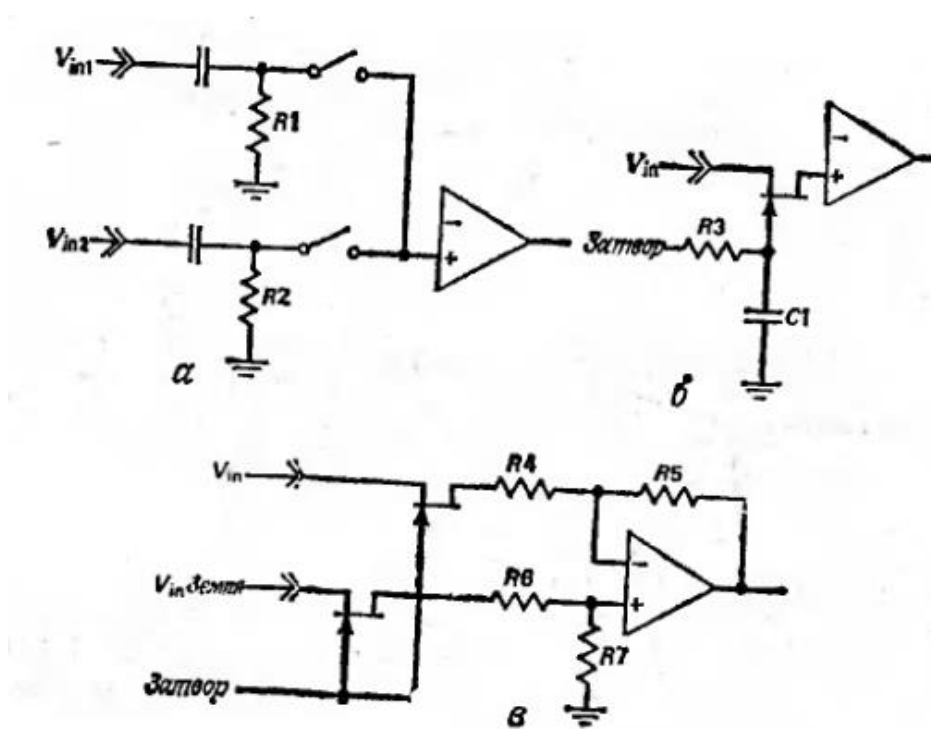


Рисунок 13.6. Перемикання аналогових сигналів

Перемикачі на польових транзисторах можуть створювати паразитний зв'язок між керуючим сигналом і входом аналогової схеми через паразитну ємність затвор – сток. Вплив цих завад можна знизити, зменшивши розмах напруги на затворі або під'єднавши до затвору RC - фільтр (рис. 13.6,б) для згладжування на ньому напруги. Якщо перемикання на вході відбувається дуже швидко, то переносу зарядів можна запобігти, використовуючи диференціальний підсилювач з узгодженими перемикачами на польових транзисторах і узгодженими входами $R_4 = R_6$ і $R_5 = R_7$ (рис. 13.6,в).

13.2 Цифрові схеми

Цифрові інтегральні схеми можуть бути як джерелами завад, так і їх приймачами. Зміна рівня цифрового сигналу завжди супроводжується появою завад. При переключенні рівня сигналів вихідна напруга змінюється з швидкістю dU/dt (В/нс), що призводить до перехресних завад та імпульсів заряду, який проходить від джерела живлення через перемикаючий елемент на землю (величина цього імпульсу заряду вимірюється в пікокулонах і визначається амплітудою цифрового сигналу, ємністю навантаження та лінії зв'язку). Завади на вході повинні перебувати в межах завадостійкості схеми, що не викликати збоїв у її роботі.

Для зменшення завад у цифрових логічних схемах, необхідно, щоб робочі сигнали мали великий час наростання та спадання і малу амплітуду. Крім того, слід обмежити кількість сигналів, які одночасно перемикаються, застосовувати ефективні методи шунтування та заземлення. Для підвищення

стійкості схем до зовнішніх завад необхідно застосовувати повільні схеми синхронізації з тригерами Шмітта на вході. Якщо система має довгі кабелі, бажано використовувати диференціальні передавачі та приймальні пристрої, з'єднані симетричними лініями зв'язку, щоб знизити рівень створених і сприйнятих завад.

Шунтуючі конденсатори є джерелами імпульсного струму, який споживають цифрові схеми при перемиканні, зменшують спад напруги в колах живлення та заземлення, сприяють фільтрації завад, які створюють заземлення та джерела живлення.

Традиційний простий спосіб шунтування, який застосовують у цифрових схемах полягає в тому, що оксидний шунтуючий конденсатор великої ємності (10-100 мкФ, ≥ 1 мкФ на кожен блок) розміщують поблизу джерела живлення. Поряд з кожною тригерною ІС ставлять шунтуючий керамічний конденсатор ємністю 0,1 мкФ, а до швидкодіючих схем під'єднують також керамічні шунтуючі конденсатори малої ємності (100 – 1000 пФ). Кожна схема, яка передає сигнал за межі друкованої плати, на якій вона розміщена, або приймає сигнали, джерела яких містяться за межами даної плати має керамічний шунтуючий конденсатор ємністю 0,1 мкФ між джерелом живлення та колом зворотного струму сигналу (рис. 13.7). На всі інші ІС припадають керамічні шунтуючі конденсатори ємністю 0,01 - 0,1 мкФ, причому на 5 ІС припадає принаймні 1 конденсатор. Такий спосіб шунтування має два недоліки: шунтуючі конденсатори дорогі і, крім того, вони слабо фільтрують завади з частотою вище 10 МГц через низькі власні резонансні частоти.

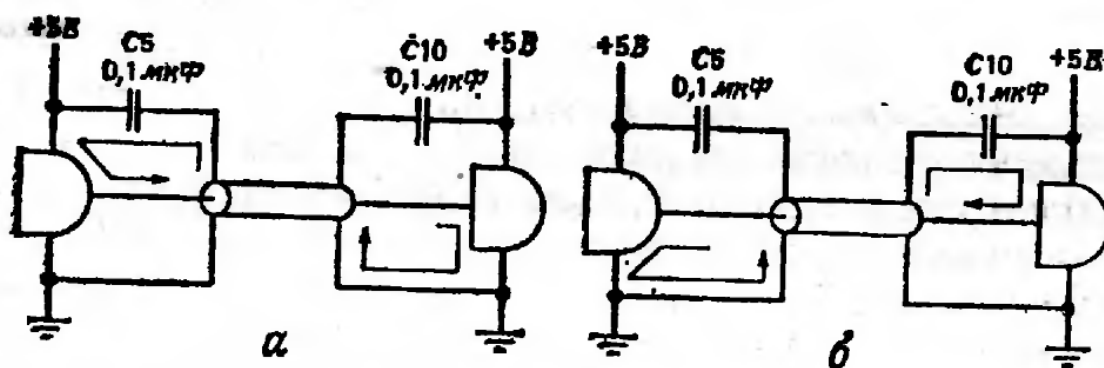


Рисунок 13.7. Шунтування передавальних і приймаючих елементів, які перебувають поза платою: а – при переході від нижнього логічного рівня до верхнього; б – при переході від верхнього логічного рівня до нижнього.

При іншому способі шунтування два конденсатори і розміщене між ними феритове кільце утворюють П-подібний фільтр, який послаблює високочастотні завади в друкованій платі. Усі інші ІС супроводжують керамічними шунтуючими конденсаторами ємністю $C \geq 4,5n_{out}C_L$ (Ф), де n_{out} - кількість виходів ІС. Поблизу джерела живлення розміщують танталові оксидний (або полікарбонатний з металізованими обкладками) конденсатор

для фільтрації низькочастотних завад. Ємність останнього повинна принаймні в 10 разів перевищувати ємність усіх інших конденсаторів у колі разом узятих.

Таке розміщення дешевих компонентів забезпечує задовільне шунтування до частот 100 МГц і більше. Керамічні конденсатори повинні мати еквівалентну послідовну індуктивність менше 0,5 Ом. З урахуванням індуктивності виводів танталові (або полікарбонатні конденсатори) повинні мати еквівалентну послідовну індуктивність і опір відповідно менше 30 нГн і менше 1 Ом. Імпеданс феритового ємця при тактовій частоті схеми не повинен перевищувати 10 Ом, а при частотах, які перевищують тактову частоту ІС у 5 разів, імпеданс повинен перевищувати 50 Ом на робочому струмі. Найкращі результати отримують при подвійному пропусканні проводу крізь феритове кільце. Якщо імпеданс одного феритового кільця замалий, то можна використовувати послідовно кілька кілець або одне більшої довжини і товщини. Якщо схема допускає додатковий спад напруги, то замість феритового кільця можна використати композиційний або металоплівковий резистор опором ≈ 51 Ом.

У діапазоні частот 30 МГц – 1 ГГц тактуючі синхросигнали та їх гармоніки є основною причиною виникнення завад. Парні гармоніки можна різко зменшити, якщо використовувати синхросигнали з 50 % коефіцієнтом заповнення (коли тривалість синхросигналів приблизно дорівнює відстані між ними). Бажано намагатися зменшити кількість інтегральних схем, керованих кожним тактовим синхросигналом. Якщо тактуючі синхросигнали повинні надходити на декілька плат, то в ролі буферів бажано використовувати вхідні логічні елементи на тригерах Шмітта, а також обмежити розмах напруги та швидкість наростання амплітуди основних синхросигналів. Якщо синхросигналами керують перемикачі поза платою, тоді треба уникати прямого керування синхросигналами від цих перемикачів. Замість цього бажано під'єднати до перемикачів кола, які керують логічними елементами на платі, що в свою чергу будуть керувати тактуючими синхросигналами. Зменшенню завад від тактуючих синхросигналів буде сприяти їх рознесення за фазою та децентралізація.

Проблему завад можна вирішити шляхом якісної синхронізації системи. Для зменшення перехідних струмів, які виникають у джерелах живлення і пристроях заземлення, слід обмежити керування невеликою групою мікросхем шляхом рознесення тактуючих сигналів. Скороченню проміжку часу, протягом якого система найбільш чутлива до впливу завад, сприяє застосування схем синхронізації та стробування вхідних даних. Зокрема, найбільша захищеність цифрової системи забезпечується при використанні двофазної синхронізації із застосуванням вузьких синхросигналів для стробування даних безпосередньо на входах D-тригерів.

Кожен вхідний сигнал, який надходить на плату, необхідно подавати лише на одну ІС (бажано з тригерами Шмітта на входах), що допомагає вирішити проблеми синхронізації. Вхідні кола на тригерах Шмітта підвищують завадостійкість і полегшують обробку сигналів з повільним наростанням

амплітуди. Якщо вхідний сигнал подається на стандартний логічний елемент, часи наростання та спадання слід підтримувати малими, щоб запобігти виникненню паразитних коливань.

На особливу увагу заслуговують сигнали, які виходять з плати. Виходи тригерів, лічильників і регістрів зсуву необхідно буферизувати логічними елементами або підсилювачами – передавачами для вирішення проблеми відбиття та викидів від неузгоджених ліній зв'язку. Пропускання проводів, які виходять з плати, через феритове кільце дає змогу підключати до виходу неузгоджені лінії зв'язку більшої довжини.

Сигнали, які виходять з плати, не повинні надходити на вхід схем, розміщених на цій же платі.

Якщо цього не дотримуватися, то можна зіткнутися з дуже серйозними проблемами завад, що виникають на вихідному передавачі (рис. 13.8).

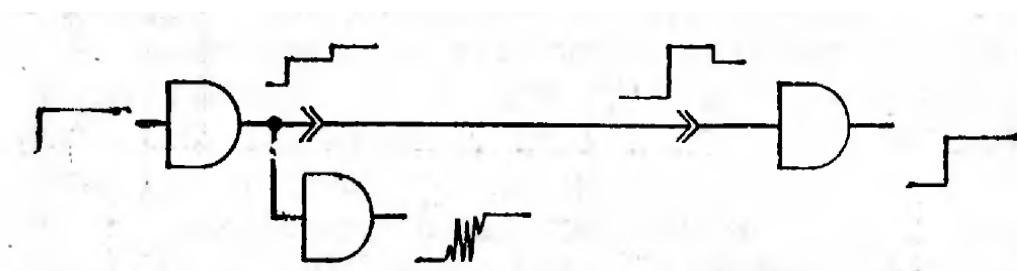
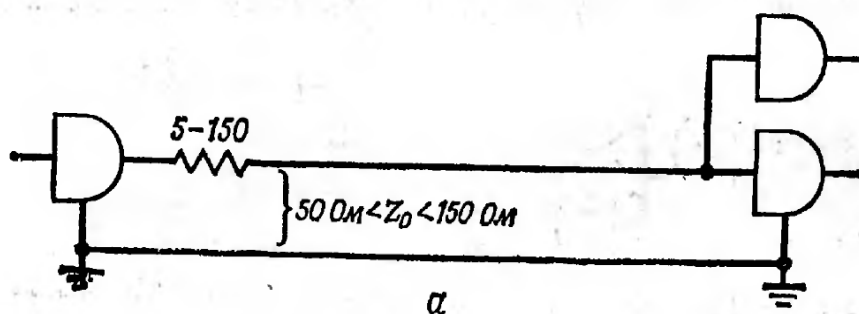


Рисунок 13.8. Викиди, викликані відбиванням сигналу в довгих провідниках

Для уникнення відбивання та викидів, довгі лінії зв'язку повинні узгоджуватися відповідно до їх характеристичного імпедансу. У цьому випадку корисним може виявитися послідовне підключення резистора, за умови, що всі приймаючі пристрої розміщені на дальньому кінці лінії зв'язку (рис. 13.9,а). Резистор необхідно підбирати таким чином, щоб при перемиканні сигналу в лінії зв'язку виникали лише незначні викиди. Резистивний подільник на віддаленому кінці лінії зв'язку дає змогу розмістити приймачі в будь-якому її місці (рис.13.9,б)



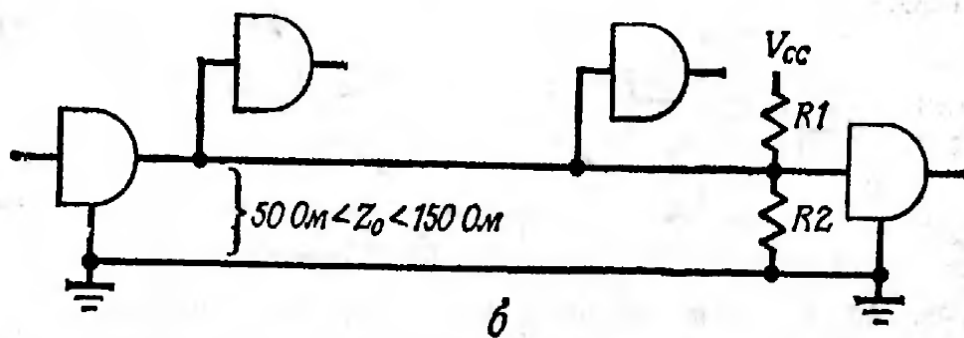


Рисунок 13.9. Схеми узгодження довгих ліній зв'язку для зменшення відбивання

Щоб подолати завади у довгій лінії, необхідно застосовувати диференціальні передавальні та приймальні пристрої з симетричними лініями зв'язку.

В однонаправлених лініях зв'язку навантаження необхідно підключати до віддалених кінців, а у двонаправлених лініях – до обох. У симетричних лініях зв'язку з належним чином узгодженим навантаженням подавлення завад може досягати 70 дБ у ліапазоні 0 – 100 кГц.

Під'єднання узгодженого навантаження до кабелів, контактних площадок друкованих плат і провідних зв'язків повинно здійснюватися завжди, коли час поширення сигналу перевищує половину часу наростання чи спадання його амплітуди. Узгоджуючий імпеданс плоских і коаксіальних кабелів, а також скручених пар складає $\approx 100\ \Omega$.

Узгоджуючий імпеданс контактних площадок друкованих плат повинен дорівнювати їх характеристичному імпедансу (від 20 Ω до 200 Ω).

Література.

Дж.Барнс Электронное конструирование: способы борьбы с помехами / Пер с англ. В.А.Исаакяна, под ред. д.т.н., проф. Б.Н.Файзулаева –М.: «Мир», 1990, 238 с.

Лекція № 14

Компонування вузлів БМА. Розбивка і компонування вузлів БМА. Методи проектування блоків живлення, методики виконання заземлення в БМА

14.1 Компонування вузлів БМА. Розбивка і компонування вузлів БМА

Розбивка і компонування в БМА вирішують задачу, що і де повинно бути розміщене в електронній системі. Проблеми виникнення завад у процесі компонування можна звести до мінімуму, ізолювавши чутливі схеми від джерел завад, усунувши паразитні індуктивні і ємнісні зв'язки, антенні ефекти та зв'язки через загальний імпеданс. Найкращий спосіб вирішити проблему завадостійкості - виключити з самого початку конструювання причини, які породжують завади. Для цього необхідно:

- зрозуміти, які види завад найімовірніші в даній схемі;
- при створенні схеми, обирати підхід, який виключає можливість виникнення в схемі якомога більшої кількості завад або зменшує ймовірність їх появи;
- вибирати та розміщувати друковані плати, кабелі та інші структурні компоненти таким чином, щоб виключити якомога більше причин виникнення завад і забезпечувати, за необхідності, під'єднання компонентів, які подавляють завади;
- відлагоджувати систему послідовно, переходячи від вузла до вузла і переконуючись, що кожен наступний вузол змонтовано належним чином, штатно функціонує і в ньому відсутні завади.

З цією метою слід враховувати наступне:

- 1) розташовувати малопотужні (чутливі) схеми поблизу від джерел сигналів;
- 2) розташовувати потужні схеми (у яких велика вірогідність виникнення завад) поблизу навантажень;
- 3) розташовувати малопотужні і потужні схеми якнайдалі одна від одної;
- 4) добиватися, щоб проводи були якомога коротші;
- 5) використовувати максимально короткі контури проходження струму.

Усі схеми можна розділити на п'ять груп:

- 1) чутливі схеми з високим імпедансом $376,7 \text{ Ом}$, в яких велика ймовірність виникнення паразитного ємнісного зв'язку);
- 2) чутливі схеми з низьким імпедансом ($|Z| < 376,7 \text{ Ом}$, з великою ймовірністю виникнення паразитного індуктивного зв'язку);

3) схеми помірної чутливості або схеми, розраховані на помірний рівень споживаної потужності;

4) високовольтні схеми;

5) схеми, розраховані на високий струм.

Аналогові схеми зазвичай потрапляють в перші дві групи, цифрові схеми відносяться до третьої групи, а схеми з'єднань і джерела живлення – до двох останніх. Можна сміливо комбінувати схеми, що належать до однієї і тієї ж групи і компонувати з них підсистеми, проте схеми з високим імпедансом слід розташовувати подалі від високовольтних схем, а схеми з низьким імпедансом не слід поміщати поряд з схемами, розрахованими на високий струм. У загальному випадку при об'єднанні схем, що належать до різних груп, сигнали, що надходять на них, повинні мати достатню стійкість до завад і помірний рівень потужності.

Схеми, які складають дану підсистему, повинні мати однакові властивості по входу/виходу і порівняний рівень завад. Такі умови призводять до того, що більшість систем доводиться підрозділяти на аналогові і цифрові підсистеми, джерела живлення і підсистеми, що містять електромагнітні прилади або перемикачі. Бажано також, щоб високочастотні і низькочастотні схеми входили в різні підсистеми. Кожна підсистема повинна бути якомога компактнішою і повинна бути забезпечена власними засобами подачі живлення і заземлення. Провідники в підсистемах повинні мати низький імпеданс, а контури проходження струму повинні бути мінімальними.

При монтажі трансформаторів, соленоїдів та інших електромагнітних пристроїв необхідно звертати увагу на те, щоб їх магнітні поля були направлені перпендикулярно одне до одного, а самі пристрої знаходилися на значній віддалі від кабелів. При проектуванні кабельної розводки слід забезпечувати мінімум довжини, мінімальний імпеданс і найменшу площу контуру. Кабелі для швидкодіючих логічних схем повинні мати не менше одного загального дроту землі на кожні п'ять кабелів, а якщо кабелі призначені для логічних схем помірної швидкодії, то не менш одного на кожні десять кабелів. Чутливі схеми з їх кабелями слід розташовувати якнайдалі від інших ділянок, використовуючи як природні екрани елементи корпусу системи. Кола заземлення підсистем повинні перетинатися тільки в одній точці, а навколо високовольтних схем і схем з високим імпедансом слід встановити заземлені екрани.

14.2 Методи проектування блоків живлення

Імпульсні джерела живлення (ключові, тобто джерела живлення з імпульсним регулюванням вихідної напруги) є основним джерелом завад частотою до 30 МГц. Лінійні джерела живлення можуть при малих вихідних струмах генерувати низькочастотні паразитні сигнали з пилоподібною зміною амплітуди, а при підключенні до них через довгі кабелі погано шунтованих

навантажень можуть збуджуватися. Іншою причиною низької завадостійкості є погана ізоляція між входом і виходом, коли завади з шини живлення потрапляють в схему через джерела живлення, а створювані схемою завади теж потрапляють в джерело живлення. Ці труднощі можна подолати ретельним вибором компонентів і топології схеми, правильним шунтуванням, а також фільтрацією і екрануванням.

На рис. 14.1 показано типову схему лінійного джерела живлення. Трансформатор $T1$ понижує або підвищує первинну напругу і забезпечує ізоляцію схеми від джерела змінного струму (первинного джерела напруги). Діоди $CR1 - CR4$ випрямляють вторинну напругу і заряджають конденсатор великої ємності згладжуючого фільтру ($C1$). Напруга V_{ref} подається на базу транзистора $Q1$ для керування вихідною напругою $V_{out} = V_{ref} - V_{be}$ [1].

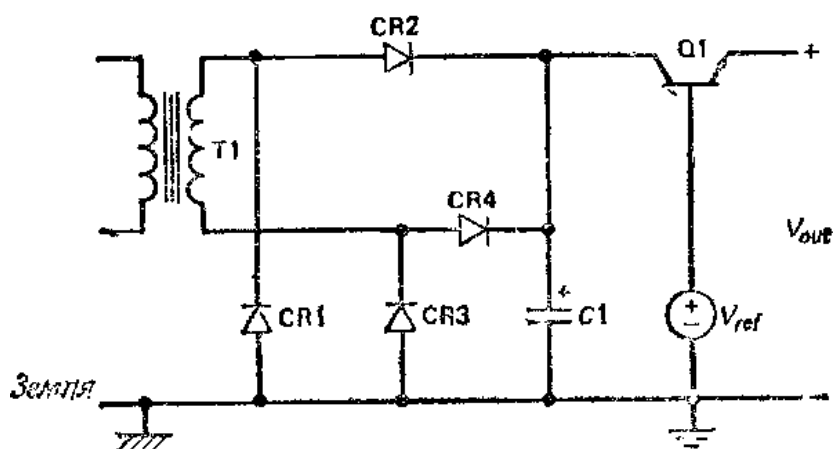


Рисунок 14.1. Схема лінійного джерела живлення

На рисунку 14.2 показана високочастотна еквівалентна схема цього джерела живлення: від джерела первинної напруги до V_{out} є послідовна ємність джерела ≈ 13 пФ і шунтуюча ємність ≈ 50 пФ, так що в схему потрапляє біля 20 % завад, що виникають в шинах живлення, і навпаки.

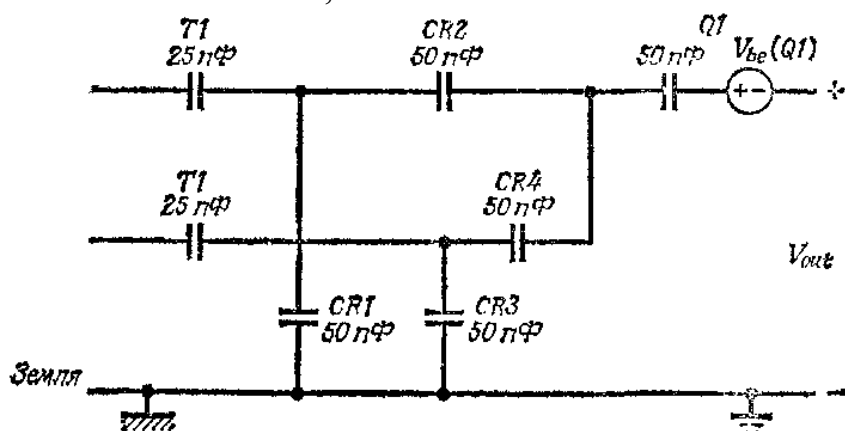


Рисунок 14.2. Високочастотна еквівалентна схема лінійного джерела живлення

Високочастотні завади надзвичайно часто виникають у шинах змінного живлення (наприклад, у побутових стереосистемах кожні декілька хвилин відбувається перепад напруги до 200 В, приблизно раз на добу – до 400 В і приблизно раз на рік – до 1000 В). Якщо приміщення знаходиться в зоні високої грозової активності, можуть спостерігатися перепади напруги до 1000 В раз на добу і до 5000 В раз на рік.

В адміністративних і виробничих приміщеннях рівень завад дуже високий: так електродвигуни створюють перепади 1500 - 2000 В. При грозових розрядах в шинах живлення поза приміщенням можуть виникати перепади напруги від 10 до 20 кВ, а у внутрішній проводці - від 2 до 6 кВ (значення 6 кВ зв'язане з можливостями електричних розеток, у яких напруга дугового розряду складає ≈ 6 кВ). У загальному випадку джерела живлення повинні витримувати перепади 3 кВ, не виходячи при цьому з ладу, а високонадійні джерела живлення повинні бути розраховані на перепади до 6 кВ.

Не набагато краще із електронними пристроями для автомобілів (наприклад, швидкої допомоги). Різкі падіння навантаження, наприклад, на генераторі змінного струму, можуть призводити до перепадів напруги до +120 В. Включення або виключення індуктивного навантаження можуть створювати перепади -300 В до +80 В. Паразитний зв'язок між дротами електропроводки може бути причиною перепадів +200 В, а при простому включенні запалення вони нерідко досягають -100 В. У звичайних умовах різні споживачі енергії в мережі електроживлення автомобіля створюють завади амплітудою $\pm 1,5$ В, а система запалення ± 3 В; при відключенні акумулятора вони можуть зрости до ± 75 В.

Один із способів захисту електронного обладнання від перепадів напруги в шинах живлення полягає у використанні пристроїв захисту.

При вмиканні випрямлячів у джерелах живлення виникають перепади напруги, а при їх вимиканні – перепади струму. Ці перепади можна ослабити, застосувавши діоди з плавним відновленням або діоди, розраховані на високі номінальні струм і напругу. Можна також обмежувати струм, який протікає через випрямляючий діод (рис. 14.3,а), зменшувати швидкість зміни струму (мал. 14.3, *б і в*) або «гасити» перепади високоякісними шунтуючими конденсаторами (рис. 14.3, *г і д*). У схемах з діодами Шоттки потрібно RC-поглиначі (рис. 14.3, *е*), що запобігають виникненню дзвону при вимиканні. Пригнічувачі перепадів на рис. 14.3, а; 14.3, *в* і 14.3, *д* також перешкоджають потраплянню в схему зовнішніх завад або відводять їх на землю, покращуючи ізоляцію між входом і виходом джерела живлення і зменшуючи завадочутливість схеми.

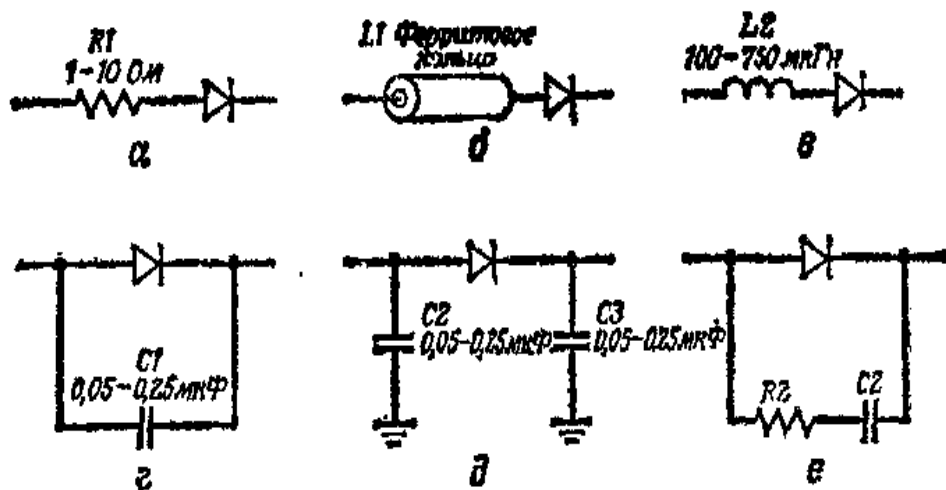


Рисунок 14.3. Засоби для ослаблення перехідних процесів при вмиканні та вимиканні випрямних діодів

Існує кілька шляхів підвищення завадостійкості джерела живлення на рис. 14.1. Найважливіше забезпечити схему від завад, що виникають в мережі первинного живлення, оскільки вони можуть вивести схему з ладу. На рис. 14.4, а показано типовий комерційний фільтр, який використовується для захисту від мережових завад.

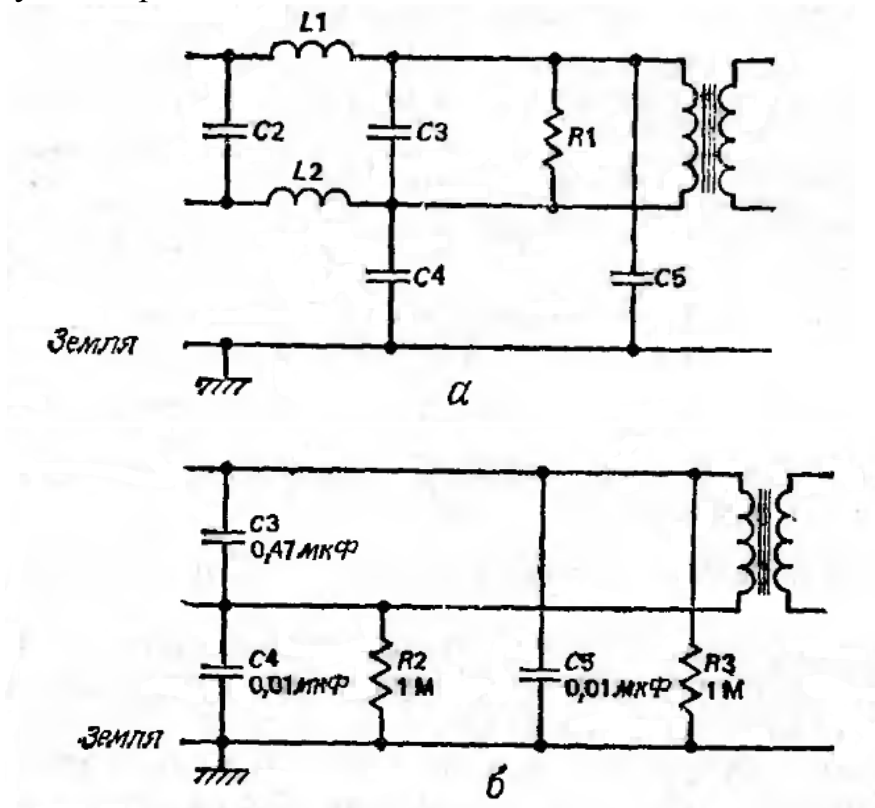


Рисунок. 11 4. Способи ослаблення завад первинної мережі.

Компоненти $L1$ і $L2$ блокують високочастотні завади, $C2$ і $C3$ захищають від високочастотних диференціальних завад, а $C4$ і $C5$ - від високочастотних

синфазних завад. Типові номінали цих компонентів: $L1$ і $L2$ від 1,8 до 47 мГн, $C2$ і $C3$ від 0,1 до 2 мкФ і $C4$ і $C5$ від 0,0022 до 0,033 мкФ. Вищі значення ємностей $C4$ і $C5$ підсилюють б придушення завад, проте, згідно інструкцій з техніки безпеки, блукаючі струми не повинні перевищувати 3,5 мА для заземлених систем і 0,5 мА для незаземлених систем.

Може знадобитися і стабілізуючий резистор ($R1 \ll 0,4 \text{ Ом} \cdot \Phi / (C2 + C3)$) навантаження для розряджання $C2$ і $C3$. При виборі мережевого фільтру для подавлення завад джерела живлення з імпульсним регулюванням необхідно, щоб резонансна частота фільтру була меншою, ніж частота перемикавання.

Іноді потрібна незначна фільтрація, наприклад за допомогою схеми на рисунку 14.4,б. Тут $C3$ - паперовий або плівковий конденсатор, а $C4$ і $C5$ - стандартні дискові керамічні конденсатори на 1,4 кВ, $R2$ і $R3$ - композиційні резистори. Цю схему можна зібрати на друкованій платі, слідкуючи, щоб виводи конденсатора були якомога коротші. Всі компоненти, які використовують в таких фільтрах, встановлених в шинах живлення, повинні витримувати змінні напругу і струм, що удвічі перевищують номінальні значення для цього фільтру. Якщо джерело живлення лінійне, то частота відсікання фільтру повинна в 1,5 рази перевищувати максимальну частоту змінної напруги на вході.

Силкові трансформатори доцільно екранувати. У звичайних трансформаторів ємність, що створюється обмотками, складає 10-50 пФ. У трансформаторів з електростатичним екрануванням, коли екран приєднується до схемної землі (рис. 14.5,а), ця ємність падає до $\approx 0,01$ пФ.

При подвійному екрануванні трансформаторів екран первинної обмотки повинен кріпитися до силової землі, а вторинної - до схемної землі. Щоб переконатися в тому, що проблеми завад у трансформаторі з електростатичним екрануванням вирішені, можна скористатися секціонованим розв'язуючим трансформатором, який показаний на рисунку 14.5,б.

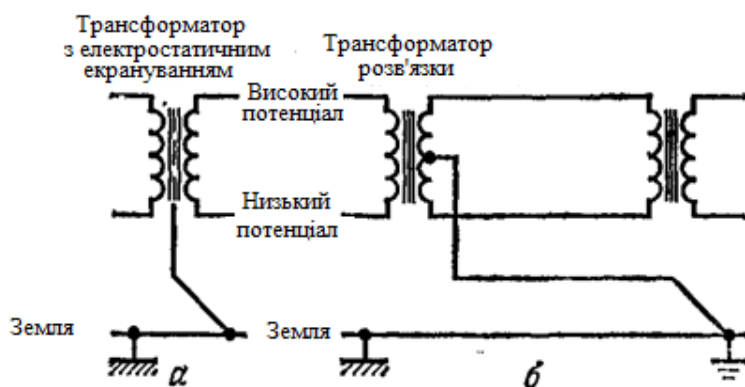


Рисунок 14.5. Ослаблення паразитного зв'язку через трансформатор.

Що стосується вторинної обмотки (рис. 14.6), то на виводи трансформатора для придушення імпульсних завад можна надіти феритові кільця ($L3$ і $L4$); вони також сприятимуть повільнішому зростанню амплітуди

імпульсів зарядного струму і зменшенню перепадів при вимкненні випрямляча. Можна додати варистор $R1$ для придушення високовольтних перепадів і конденсатори $C6$ і $C7$ невеликої ємності для відведення на землю високочастотних завад.

Для запобігання дії завад схеми на джерело живлення рекомендується скористатися прохідним конденсатором $C8$ і феритовим кільцем $L5$. (Зауваження. Для феритових кілець $L3$ і $L4$ найефективніша при навантаженнях з низьким імпедансом.)

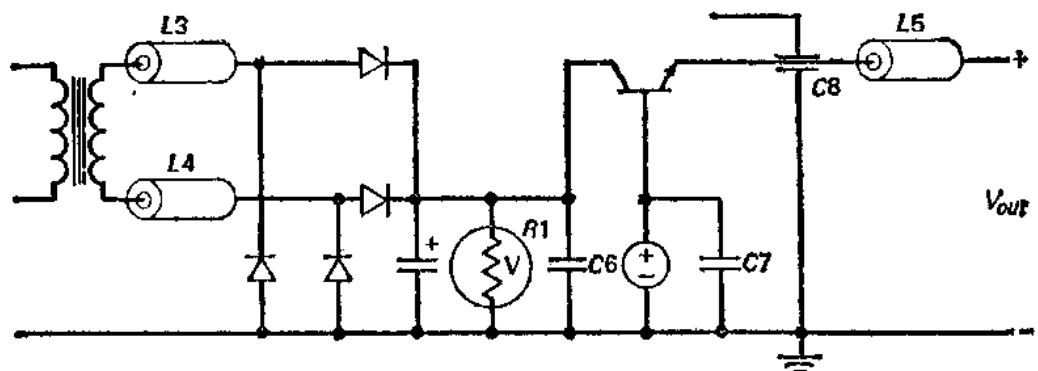


Рисунок 14.6. Ослаблення завад у колах вторинного живлення

На рисунку 14.7 представлена високочастотна еквівалентна схема джерела живлення, в якому повністю відсутні завади.

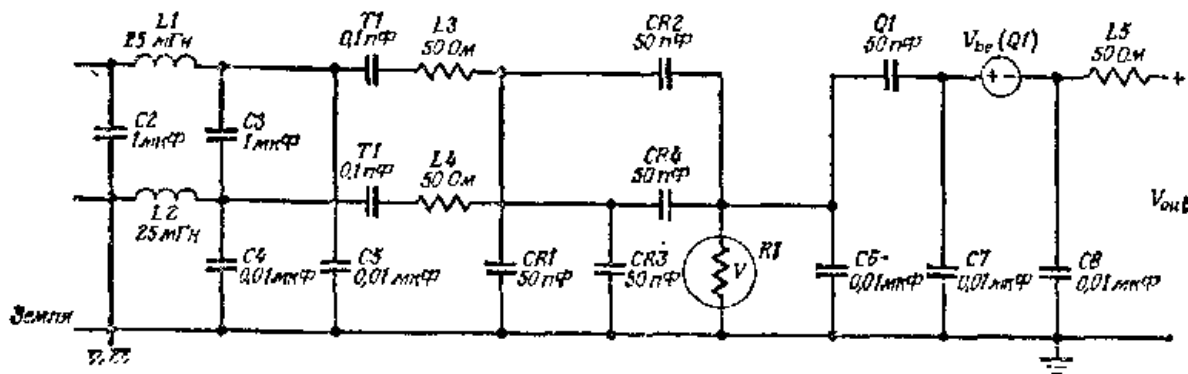


Рисунок 14.7. Високочастотна еквівалентна схема лінійного джерела живлення, в якому відсутні завади

Компоненти $L1-L5$ блокують високочастотні завади, здатні проникати в навантаження з первинної мережі змінної напруги і назад. Компонент пригнічує високовольтні перепади, а компоненти $C2-C8$ ліквідовують високочастотні завади. Дуже незначний рівень завад може проходити через схему джерела живлення, проте, щоб поліпшити розв'язку між входом і виходом, необхідно кола змінного струму розташовувати на значному віддаленні від кіл постійного струму.

Імпульсні джерела живлення можуть створювати підвищений рівень завад унаслідок ємнісного паразитного зв'язку між перемикаючими транзисторами і їх радіаторами. Її можна зменшити, помістивши між транзистором і радіатором екран і з'єднавши його зі схемною землею. Для таких екранів створені спеціальні ізолюючі матеріали.

Для живлення високочастотних і низькочастотних схем рекомендується використання окремих джерел. Так само, якщо пристрій містить високопотужні і малопотужні схеми, вони повинні живитися від окремих джерел або мати стабілізатор напруги. Якщо джерело живлення не має зовнішньої орієнтації потенціалу вихідної напруги, одну з його клем слід з'єднати з клемою заземлення на корпусі. Якщо така орієнтація є і джерело живлення працює на єдине навантаження, то одну з клем навантаження слід з'єднати з клемою заземлення на корпусі. Якщо ж джерело живлення підключене до декількох навантажень, то до клеми заземлення на корпусі підключається одна з опорних точок навантаження.

Лекція № 15

Методи проектування монтажних плат. Характеристика контактних з'єднань. Вибір матеріалу для контактних з'єднань. Вимоги до друкованих плат. Провідний монтаж і друковані плати - методи проектування.

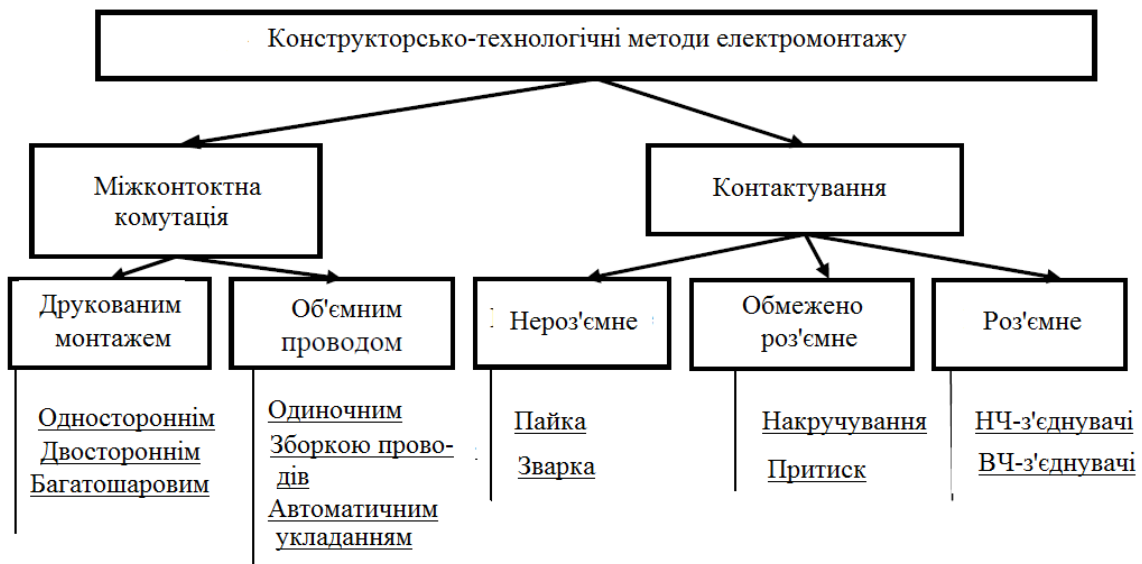
15.1. Методи проектування монтажних плат

Компонування БМА здійснюється шляхом просторового розміщення компонентів за рівнями конструкторської ієрархії. Окремі компоненти, елементи конструкторської ієрархії повинні бути електрично з'єднані між собою.

Електричні з'єднання – це частина конструкції, призначена для забезпечення електрично-нерозривних зв'язків між елементами та складовими частинами БМА між собою відповідно до принципової або монтажною схеми. Технологічний процес виконання електричних з'єднань називають електромонтажем (або монтажем). На рисунку 15.1' наведені конструкторсько-технологічні методи монтажу.

Рисунок 15.1'. Класифікація методів електромонтажу

Якість виконання електричних з'єднань і його конструктивне та



технологічне виконання значною мірою визначають ефективність і якість конструкції БМА в цілому. Електричні з'єднання можуть вносити спотворення, затування і затримку неперервного чи дискретного сигналу при поширенні лініями електричного зв'язку, а паразитні зв'язки та завади можуть порушувати нормальне функціонування апаратури.

Трудоємність збиральних та монтажних робіт становить 40..60% всієї трудоємності виготовлення виробу.

Надійність БМА визначається значною мірою кількістю контактів, які входять в електричне з'єднання. Ймовірність відмови кожного з них відповідає приблизно ймовірності відмови всього мікроелектронного вузла на кристалі. Тому, чим менше контактів і контактних груп, тим вища надійність виробу.

15.2 Характеристика контактних з'єднань.

Якісні контактні з'єднання проводів необхідні для формування стабільних однорідних струмових шляхів з якомога меншим опором. Якісні контакти у низькочастотних схемах повинні мати опір $\leq 0,5$ мОм та індуктивність ≤ 25 нГн, у той час, коли у високочастотних схемах аж до 20 МГц імпеданс контактів не повинен перевищувати 80 мОм. Найкращі контакти отримують при безпосередньому суцільному однорідному сполученні двох металів, сполучених зварюванням, високотемпературною пайкою, екзотермічним приєднанням, пайкою сріблом або пайкою, при якій довжина шва перевищує перекривання провідників. Система заземлення для захисту від грозових розрядів повинна бути виконана з мідного дроту діаметром 2,053 мм або алюмінієвого дроту діаметром 2,588 мм, причому площа контактів захисного заземлення повинна перевищувати 5 мм². Слід зауважити, що використання легкоплавкого припою для виготовлення контактів, через які може протікати струм грозового розряду неприпустиме.

Трохи гіршими за якістю будуть контакти, отримані компресією двох металів. Для такого з'єднання контактуючі поверхні необхідно підготувати певним чином:

- 1) очистити поверхню, площа якої приблизно на 50% перевищує площу контакту, за допомогою металевої щітки або абразивів;
- 2) акуратно прибрати утворене сміття;
- 3) обробити поверхню розчинником;
- 4) добре підсушити поверхню шматком сухої тканини.

Після такої обробки поверхня повинна бути чистою і блискучою. Не пізніше, ніж через годину після підготовки поверхонь, необхідно притиснути провідники один до другого за допомогою болтів або гвинтів і створити на місці дотику тиск 8 300-10 300 кПа (нижня межа стосується м'яких металів).

Досить задовільні контакти можна отримати при поєднанні металів з провідним покриттям. На метали можна нанести кадмій, олово, срібло або деякі сплави. Якщо виникає небезпека порушення контакту, можна використати провідні пасти для укріплення швів.

Для здійснення контакту між з'ємними модулями або модулями на амортизаційній підвісці, можна використати суцільні металеві перемички, обплетення або дріт. Їх необхідно розміщувати таким чином, щоб вони були доступні для огляду і одночасно були захищені від випадкових пошкоджень. Перемички повинні бути короткими і широкими з відношенням довжини до ширини 5 (а краще 3), для забезпечення мінімального імпедансу заземлення. Заземлюючі перемички в жодному разі не можна з'єднувати послідовно.

Суцільні мідні перемички повинні мати товщину і ширину відповідно менше 0,1 мм і більше 30 мм, а товщина перемичок з алюмінію не повинна перевищувати 0,2 мм. Обплетення є гнучкішими, проте вони легко можуть підпадати під вплив корозії (а розірваний дріт при високих частотах може діяти як антена). Для заземлення слід використовувати дріт діаметром 1,024 мм. Якщо дріт доводиться часто від'єднувати, то використовують спеціальні клеми, які забезпечують швидке підключення. Зіркоподібні прокладки із зовнішніми зубцями, поміщені під клеми, забезпечують створення суцільного контакту. Резонансна частота перемичок або дротів повинна принаймні в 16 разів перевищувати максимальну робочу частоту схеми, яку заземлюють або шунтують.

Не можна використовувати контакти на само нарізних гвинтах, гвинтовій різьбі, гайках, підшипниках, шарнірах чи ковзаючи деталях. Такі контакти ненадійні, а струми заземлення можуть викликати сильну корозію.

15.2 Монтажні плати

Після розбиття системи на модулі і завершення системи заземлення приступають до конструювання кожного модуля. У більшості випадків все, що можна, розміщують на монтажній платі, а важкі, масивні компоненти та компоненти, які споживають велику потужність, розміщують на корпусі або радіаторі. Простий модуль можна розмістити на одній платі, а для складного модуля необхідно багато монтажних плат, зібраних на єдиній платі – панелі.

Монтажні плати можна розділити на три основних типи: плати для монтажу методом накручування, друковані плати і плати з тонко дротовим монтажем.

Монтажні плати першого типу використовують для дослідних зразків або для дрібносерійного виробництва. Їх легко конструювати та модифікувати, але вони непридатні для масового виробництва і займають багато місця. Друковані плати використовують у масовому виробництві, а також для створення швидкодіючих і малогабаритних систем. За їх допомогою легко виконувати збірку системи, вони компактні і мають хороші високочастотні характеристики. Їх основні недоліки – це тривалий час конструювання і труднощі, з якими доводиться стикатися при внесенні конструктивних змін.

На даний час ряд фірм пропонують засоби для автоматичного трасування плат і програмні засоби конструювання за допомогою яких у фольгованому міддю діелектрику з регулярним чергуванням шарів можна нанести необхідний рисунок електромонтажу друкованої плати. Такі системи дають змогу виготовляти дослідні зразки одно- та двосторонніх плат приблизно за годину. Плати з тонко дротовим монтажем мають хороші високочастотні характеристики, але не дають виграшу у часі та вартості. Проте на даний час у зв'язку з різким зростанням щільності монтажу і серйозними технологічними труднощами виготовлення крупно форматних багат шарових друкованих плат метод монтажу типу Multi-wire стає переважаючим для виготовлення високо

щільного монтажу крупно форматних об'єднувальних плат (панелей) з фіксованим хвильовим опором ліній зв'язку.

Конструювання монтажних плат можна умовно розбити на вісім основних етапів: 1) визначення розмірів та форми плати та положення з'єднувачів; 2) визначення розміщення ІС; 3) розміщення на платі кіл землі та живлення; 4) розміщення дискретних компонентів; 5) визначення топології кіл землі та живлення; 6) розкладка кіл синхронізації; 7) розкладка інших сигнальних кіл; 8) остаточне доведення проекту.

Розмір і форму друкованих плат, а також положення з'єднувачів можна визначити беручи до уваги фізичний проект (фізичну модель) виробу. Форма плати повинна бути по можливості ближчою до квадратної, оскільки при цьому полегшується її конструювання та виготовлення, крім того, така форма сприяє зменшенню довжини дротів. Рекомендується зробити креслення, вказавши на ньому ділянки для направляючих для встановлення плат, монтажних приспособлень, отворів, з'єднувачів та інших фіксованих компонентів.

На другому етапі необхідно вирішити, де розмістити ІС. На кресленні поблизу з'єднувача необхідно розмістити схеми вводу/виводу і, відштовхуючись від них, продовжувати планування. Зв'язані між собою схеми розміщують поряд, слідкуючи при цьому, щоб чутливі схеми були розміщені якомога далі від схем у яких велика ймовірність виникнення завад. Швидкодіючі логічні схеми розміщують біля основного з'єднувача, схеми інтерфейсу – біля з'єднувача інтерфейсу, а аналогові схем окремо від цифрових.

Слід звертати увагу і на орієнтацію ІС та інших крупних компонентів. На двосторонніх платах ІС необхідно розміщувати паралельно до з'єднувачів (рис.15.1, *а,б*), а у випадку багатошарових плат вони повинні бути розміщені паралельно до більшої осі плати (рис.15.1, *в,г*).

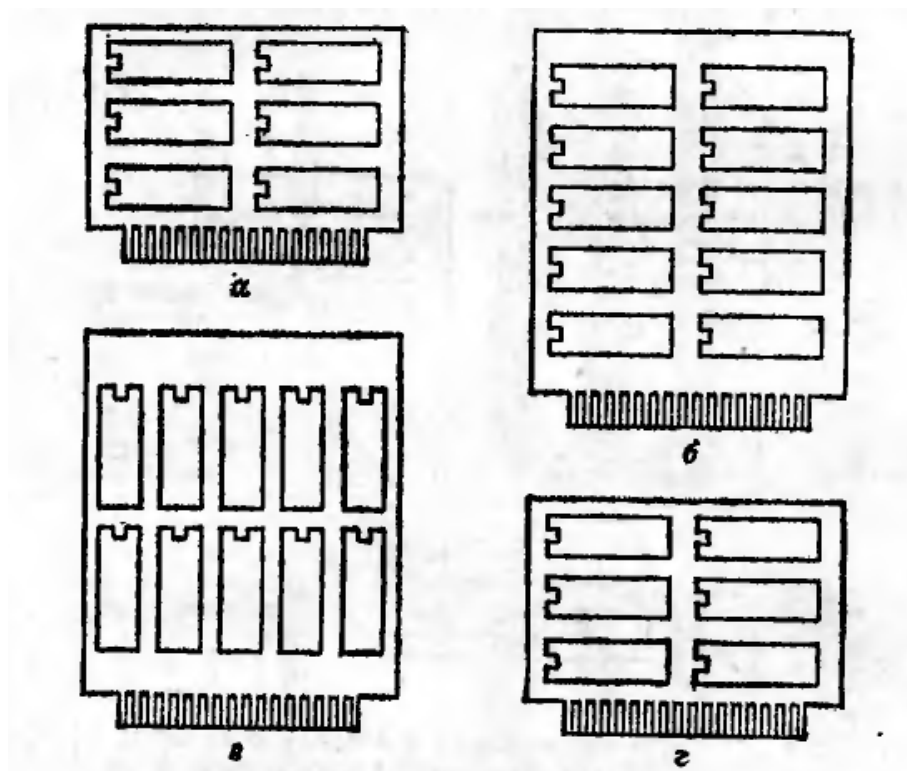


Рисунок 15.1. Бажана орієнтація ІС на платі (*а, б* – на двосторонній платі, *в, г* – на багатошаровій платі).

На третьому етапі необхідно продумати схему живлення та кола заземлення. При цьому можна: розмістити їх довільним чином і сподіватися на краще; використати компланарні лінії передачі; використати паралельні шини; використати заземлюючі площини (рис. 15.2).

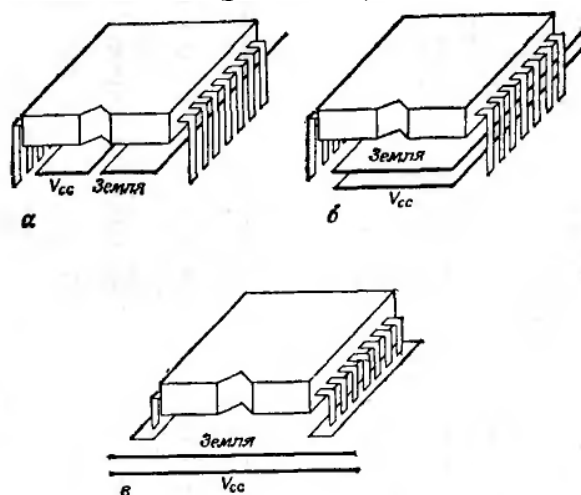


Рисунок 15.2. Розміщення шин живлення та заземлення (*а* – компланарні лінії, *б* – паралельне розміщення шин; *в* – заземлююча площина).

Паралельні шини сприяють зменшенню завад, проте вони повинні мати спеціальну форму. Шини можна розмістити під ІС або паралельно їм. Вони здатні витримувати струм 2,5 – 15 А, мають розподілену ємність 0,001 – 2

мкФ/м та індуктивність $14 - 35 \text{ нГн/м}$. Імпеданс джерело живлення – земля складає $0,15 - 5 \text{ Ом}$. Для зменшення завад на шинах заземлення контактні площинки схем заземлення повинні бути великими і розміщуватися перпендикулярно до шин.

У багатошарових друкованих платах можна використати суцільні шари заземлення та шари живлення; можна також розподілити шари живлення між кількома джерелами. Для надійнішого захисту від завад верхні та нижні шари плати повинні бути заземлюючими або живлячими, а сигнальні шари необхідно розміщувати посередині. Шар живлення над заземлюючим шаром має розподілену ємність $0,1 - 10 \text{ мкФ/м}^2$ і надзвичайно малу індуктивність. У платах типу Multi-wire використовують тільки шари земля – живлення, а як сигнальні лінії використовують тонкий ізолюваний дріт.

Четвертий етап полягає в розміщенні компонентів. Для цього потрібне точне креслення плати і з'єднувачів. На кресленні необхідно розмістити всі компоненти, місцеположення яких є критичним для якості функціонування (мікропроцесори, оптрони, трансформатори розв'язки, фільтри та ін..). Якщо компонент належить зразу до кількох схем, його розміщують ближче до спільної межі. Об'ємні конденсатори та феритові кільця слід розміщувати якнайближче до виводів живлення та заземлення з'єднувачів. В ІС з конденсаторами шунтуючі конденсатори монтують безпосередньо під інтегральними схемами.

В аналогових схемах компоненти повинні бути розміщені таким чином, щоб забезпечити розв'язку між входом та виходом (рис. 15.3). Необхідно залишити місце для розміщення шунтуючих конденсаторів і конденсаторів зворотного зв'язку. Неекрановані котушки індуктивності необхідно розміщувати подалі одна від одної або ставити під прямим кутом для зменшення індуктивного зв'язку. Компоненти бажано розміщувати таким чином, щоб сигнальні контури були по можливості коротшими і компактнішими. Чутливі сигнальні схеми слід захистити за допомогою спеціальних кілець і заземлити їх (рис.15.3, б) або з'єднати їх низькоімпедансним виходом (рис.15.3, а) для запобігання від струмів витікання на вході (для дуже чутливих схем можна використати фторопластові вставки). Бажано, щоб на тій стороні, де монтують компоненти знаходилась суцільна заземлююча площа.

Для плат з монтажем накручуванням процес конструювання по суті завершується.

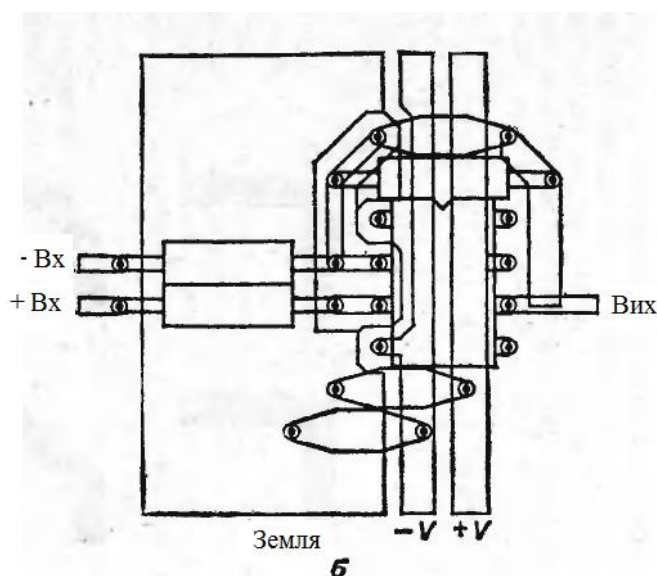
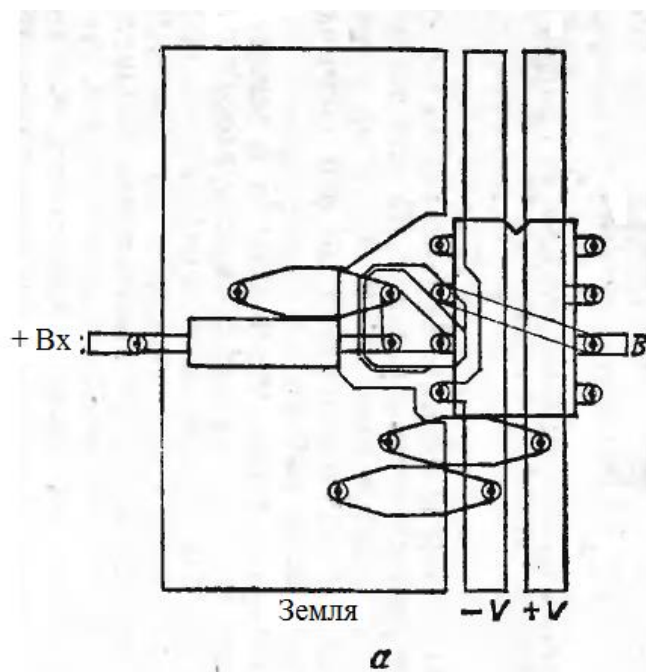


Рисунок 15.3. Топологія друкованої плати для аналогових схем (*а* – неінвертуючий буфер *б* – інвертуючий підсилювач)

При виготовленні плати з монтажем накручуванням спочатку необхідно виконати весь силовий та заземлюючий монтаж і лише потім переходити до монтажу сигнальних проводів. Для того, щоб звести до мінімуму паразитну індуктивність між джерелом живлення та землею, довжину силових і заземлюючих виводів слід довести до ≈ 6 мм, згорнути їх у півкільце та припаяти безпосередньо до контактних площинок на платі. Можна також використати спеціальні затискачі, які з'єднують виводи змонтованих внакрутку дротів з контактними площинками плати.

Для зменшення завад у сигнальних колах необхідно спочатку навісним монтажем припаяти довгі проводи, а потім короткі. Для додаткового захисту від завад необхідно з'єднати виводи заземлення із змонтованими внакрутку дротами для утворення сітки заземлення над сигнальним колом.

При роботі з платами Multi-wire необхідно використовувати таблиці монтажних з'єднань, складальні креслення і таблиці розміщення виводів компонентів. Ці плати мають з одного боку заземлюючий мідний шар товщиною 50 мкм, а з другого боку – сітку мідних проводів з поліамідною ізоляцією. Номінальний імпеданс цих проводів 55 Ом, ємність, зумовлена перетином ≈ 1 пФ і пробивна напруга 2 000 В.

П'ятий етап – вибір розміщення контактів силових і заземлюючих ліній. На рис. 15.4 *а* показано топологію, яка дуже часто зустрічається і недоліками якої є довгі контури протікання струму, висока паразитна індуктивність між силовими та заземлюючими лініями і наявність сильних завад. Розміщення шунтуючих конденсаторів вздовж ІС (рис. 15.4, *б*) скорочує довжину струмових контурів, зменшуючи тим самим паразитну індуктивність і завади живлення – земля. Розмістивши контакти до заземлення та живлення під ІС (рис. 15.4, *в*) можна ще більше скоротити довжину струмових контурів, їх індуктивність і завади живлення – земля.

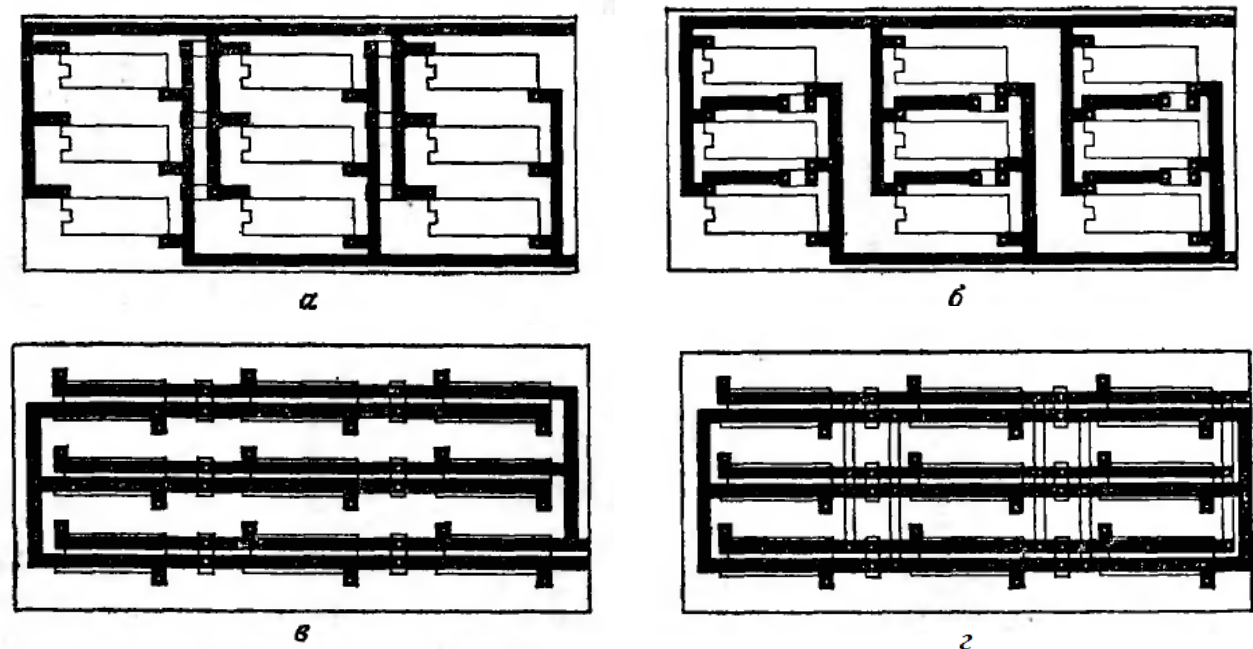


Рисунок 15.4. Розміщення шин живлення та заземлення на двосторонніх платах

Додавання поперечних зв'язків (рис.15.4, *г*) створює сітчасту топологію кіл живлення та заземлення з малою довжиною струмових контурів, дуже низькою індуктивністю, слабкими завадами живлення – земля та слабкими завадами в колах заземлення. Рівень завад у платах з такою топологією ліній живлення та заземлення близький до того, який є в дорогих багатошарових платах.

Шостий етап – монтаж синхронізуючих кіл таким чином, щоб вони знаходилися поблизу цифрової землі, але були віддалені від чутливих схем. Добре зарекомендував себе метод, при якому формують пару кіл із проводів прямого та зворотного синхросигналу. Зворотні проводи синхросигналів необхідно з'єднати з цифровою землею поблизу кожної ІС, яка передає чи сприймає синхронізуючі імпульси. У багатошарових платах ці кола необхідно

розміщувати після розміщення шарів живлення та землі. Кола синхронізації повинні бути дуже короткими, оскільки синхронізуючі імпульси та їх гармоніки створюють дуже сильне випромінювання і один контур площею $0,001 \text{ м}^2$ може створити електромагнітне поле, яке набагато перевищує допустимі межі.

Далі розміщують решту кіл сигнальних ліній. Якщо є матриця кристалів пам'яті, то адресну шину необхідно розміщувати в одному напрямі, а шини даних та дозволяючи шини – в іншому. Коло до наймолодшого розряду адреси повинно знаходитися безпосередньо після контакту заземлення. Необхідно, щоб ширина кіл була не більшою $1/150$ від їх довжини і не допускати зигзагоподібних трактів. Слід уникати різких вигинів (рис. 15. 5, *a*).

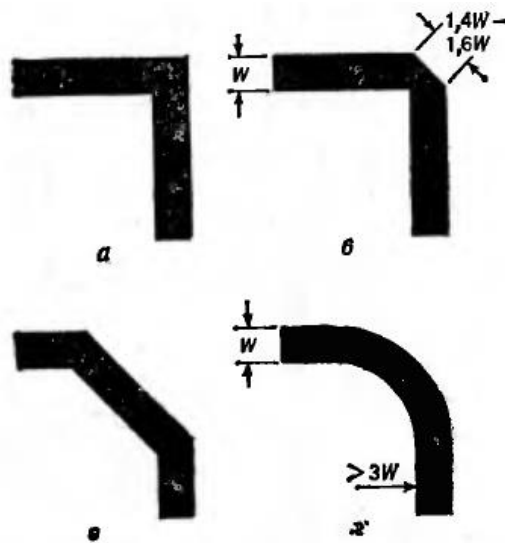


Рисунок 15.5. Види вигинів контактних площадок (*a* – недопустимий; *б–г* – прийнятний).

Якщо заокруглити вершини кутів, обмежити вигини кутом 45° або використати плавні криві (рис.15.5, *б–г*), то це дасть можливість підтримувати імпеданс постійним при частотах від 0 до кількох гігагерц.

На останньому етапі необхідно, наскільки це можливо, розширити кола ліній живлення та заземлення; з'єднати між собою заземлення цифрових кіл; заповнити вільні ділянки поверхні плати фольгою і заземлити їх за допомогою кіл заземлення або наскрізних отворів. При цьому утворюється протяжна сітка заземлення, яка сприяє зменшенню струмових контурів, імпедансу заземлюючих кіл і завад, які утворюються за рахунок паразитного зв'язку між джерелом і землею та між заземлюючими проводами.

Не треба з'єднувати між собою заземлюючі проводи довільним чином, оскільки може виникнути необхідність у наявності кількох заземлюючих схем.

Лекція № 16

Методи конструювання друкованих плат об'ємного і поверхневого монтажу. Критерії вибору конструкції друкованої плати. Вимоги до проектування посадочних місць під компоненти поверхневого монтажу, залежно від виду пайки, вимоги до друкованих плат на яких встановлюються компоненти поверхневого монтажу. Методи проектування друкованих плат з елементами поверхневого монтажу.

16.1 Види друкованих плат

За видом основи друковані плати можуть бути діелектричні (склопластик, поліамідна плівка, фторопласт, кераміка) і металеві (сталь, алюміній, титан та ін..) Є багато різновидів друкованих плат і за технологічним способом отримання провідників.

Друковані плати (ДП) – основа друкованого монтажу будь-якої РЕА, при якому ІС, напівпровідникові пристрої електрорадіоелементи та елементи комутації встановлюють на ізольовану основу з системою струмопровідних металевих смужок (провідників), через які вони електрично з'єднуються між собою відповідно до електричної принципової схеми.

Друкований монтаж – спосіб монтажу, при якому електричне з'єднання елементів вузла, включаючи екрани, виконане за допомогою друкованих провідників.

Друкований провідник – струмопровідна смужка в струмопровідному рисунку.

Стандартом передбачені кілька видів друкованих плат.

1. **Одностороння друкована плата** – друкована плата, на одній стороні якої виконаний провідний рисунок (рис. 16.1,а). На односторонніх платах виконують нескладні електронні схеми з використанням дешевих фольгованих матеріалів FR-1 або FR-2 (FR – Flame Resistance (вогнестійкий), див ДОДАТОК), вони частіше мають багато перемичок, нагадуючи двосторонні плати. Такий спосіб створення ДП рекомендований тільки для низькочастотних схем. Односторонні плати дуже чутливі до наведень.

2. **Двостороння друкована плата** – друкована плата, на обох сторонах якої виконані провідні рисунки і всі передбачені з'єднання (рис.16.1,б). Для їх виготовлення в більшості випадків використовують матеріал FR-4 і лише часом FR-2. Перевагу надають FR-4, тому що в ДП з цього матеріалу отримують кращі за якістю отвори. На двосторонніх ДП значно легше розводити схеми, оскільки в двох шарах значно легше здійснити розводку трас, які перетинаються. Проте для аналогових схем виконувати перетини трас не рекомендується. Де можливо, нижній шар (bottom) відводити під полігон землі, а решту сигналів розводити у верхньому шарі (top). Використання полігону як шини землі дає ряд переваг:

- до загального проводу найчастіше відбувається підключення, тому є сенс мати багато загального проводу для спрощення розводки;
- збільшується механічна міцність плати;
- зменшується опір усіх підключень до загального проводу, що в свою чергу зменшує шум і наведення;
- збільшується розподілена ємність для кожного кола схеми, придушуючи випромінюваний шум;
- полігон є екраном, який подавляє наведення, що випромінюються зі сторони полігону.

Двосторонні ДП, незважаючи на всі переваги, не є найкращими, особливо для мало-сигнальних або високошвидкісних схем. У загальному випадку товщина ДП, тобто відстань між шарами металізації, дорівнює 1,5 мм, що забагато для повної реалізації всіх переваг двосторонньої ДП. Зокрема, розподілена ємність замала у зв'язку з таким великим інтервалом.

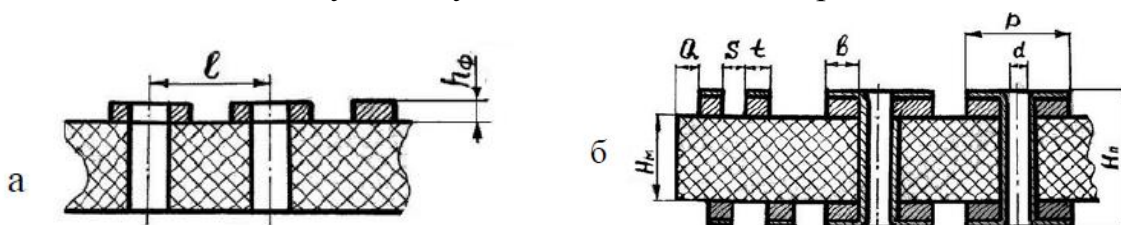


Рисунок 16.1. Типи друкованих плат (а – одностороння ДП, б – двостороння ДП).

Позначення на рисунку:

t – ширина тдрукованого провідника;

s – відстань між друкованими повідниками;

Q – відстань від краю друкованої плати до елементів провідного рисунку;

b – відстань від краю просвердленого отвору до краю контактної площинки (поясок);

D – діаметр контактної площинки;

d – діаметр отвору;

h_{ϕ} – товщина фольги;

H_M – товщина матеріалу основи друкованої плати;

H_{Π} – товщина ДП;

l – відстань між центрами отворів.

3. Багатошарова друкована плата – яка складається з почергових шарів ізоляційного матеріалу з провідними рисунками на двох чи більше шарах, між якими виконані необхідні з'єднання. Її перевагами є:

- однаково зручна і для шин загального проводу, і для шин живлення; якщо як шини живлення використовують кола на окремому шарі, то за рахунок перехідних отворів можна дуже просто здійснити підведення живлення до кожного елемента схеми;
- сигнальні шари звільняються від шин живлення, що полегшує розводку сигнальних проводів;

- між полігонами землі та живлення з'являється розподілена ємність, яка зменшує високочастотний шум.

Крім цих причини застосування багатошарових ДП є й інші менш очевидні:

- краще подавлення електромагнітних і радіочастотних завад завдяки ефекту відбиття (image plane effect), який полягає в тому, що коли провідник розмістити близько до плоскої провідної поверхні, більша частина зворотних високочастотних струмів буде протікати по площині безпосередньо під проводом. Напрямок цих струмів буде протилежний до напрямку струму в проводі. Таким чином, відображення проводу в площині створює лінію передачі сигналу. Оскільки струми в проводі та площині рівні за величиною і протилежні за напрямком, відбувається деяке зменшення випромінюваних завад. Ефект відбиття ефективно працює лише за умови суцільних, нерозривних полігонів (полігон землі або живлення);

- зниження загальної вартості при дрібносерійному виробництві. Хоча виготовлення багатошарових плат обходиться дорожче, проте їх можливе випромінювання менше, ніж у одно- та двосторонніх плат. Застосування багатошарових ДП може знизити рівень випромінюваних завад до 20 дБ порівняно з двосторонніми платами.

Іноді у розробника може виникати питання стосовно оптимального порядку слідування шарів ДП. Наприклад, для 4-ришарової плати, яка містить два сигнальних шари і два полігонних шари – шар землі та шар живлення. Який порядок кращий? Розмістити сигнальні шари між полігонами, які будуть екранами, чи зробити полігонні шари внутрішніми, щоб зменшити взаємний вплив сигнальних шарів?

При вирішенні цього питання важливо пам'ятати, що часто розміщення шарів не має особливого значення оскільки всі компоненти розміщують на зовнішніх шарах, а шини для підведення сигналів, часто проходять через усі шари. Тому будь-які екранні ефекти представляють собою лише компроміс. У даному випадку краще подумати про створення більшої розподіленої ємності між полігонами живлення та землі, розмістивши їх у внутрішніх шарах.

Іншою перевагою розміщення сигнальних шарів зовні є доступність сигналів для тестування, а також можливість модифікувати зв'язки.

Для друкованих плат з більш ніж 4-ма шарами, існує загальне правило розміщувати високошвидкісні сигнальні проводи між полігонами землі та живлення, а низькочастотні – на зовнішніх шарах.

Не можна допускати перекриття аналогових і цифрових полігонів (рис. 16.2.).

Шини та полігони аналогового живлення необхідно розміщувати над полігоном аналогової землі (аналогічно для шин цифрового живлення). Якщо в якомусь місці існує перекриття аналогового та цифрового полігона, розподілена ємність між ділянками, які перекриваються, буде створювати зв'язок по змінному струму і тоді наводки від роботи цифрових компонентів потраплять в аналогову схему.



Рисунок 16.2. Розміщення полігонів аналогових і цифрових сигналів

Такі перекриття анулюють ізоляцію полігонів.

4. **Гнучка друкована плата** – з гнучкою основою.

5. **Гнучкий друкований кабель** – система паралельних друкованих провідників, розміщених на гнучкій основі.

Провідний рисунок – сукупність усіх елементів на окремому шарі ДП, утворених провідним матеріалом. Перемички ДП – відрізок провідникового матеріалу, який не входить в рисунок ДП и забезпечує електричне з'єднання між двома точками провідного рисунку на одній стороні ДП. Їх встановлюють, якщо неможливо виконати з'єднання друкованим провідником.

Різновидності отворів на ДП – монтажні, які можуть бути металізованими, і отвори кріплення. Кожен монтажний та перехідний отвір повинен бути охоплений контактною площиною.

За точністю виконання Дп ділять на п'ять класів (див. табл. 16.1).

Таблиця 16.1

Найменші номінальні значення номінальних розмірів елементів друкованого монтажу для вузького місця залежно від класу точності

Умовні позначення елементів друкованого монтажу	Клас точності ДП				
	1	2	3	4	5
t , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
S , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
b , мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025
$\gamma = d/H$	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20

1-й і 2-й класи застосовують при малому заповненні поверхні ДП дискретними елементами та мікросхемами малого ступеня інтеграції.

3-й клас використовують для мікросхеми з штирковими та планарними виводами при середньому і високому заповненні елементами поверхні ДП.

4-й клас – при високій щільності заповнення поверхні ДП мікросхемами з виводами і без них.

5-й клас – при дуже високій щільності заповнення поверхні ДП елементами з виводами і без них.

Ширину друкованих провідників вибирають залежно від допустимого струмового навантаження, властивостей струмопровідного матеріалу, температури оточуючого середовища при експлуатації. Краї провідників повинні бути рівними без відслоювань, розривів, тріщин, пор та інших дефектів, які впливають на опір та ін.

Відстань між елементами провідного ресурса залежить від допустимої робочої напруги, властивостей діелектрика, умов експлуатації і зв'язана із завдостійкістю, спотворенням сигналів і коротким замиканням.

Координатна сітка креслення ДП необхідна для координації елементів друкованого рисунка (рис.16.3).

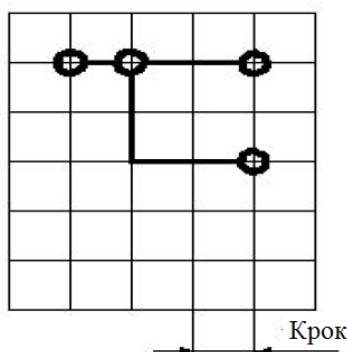


Рисунок 16.3. Координатна сітка креслення ДП

У вузлах сітки (на перетині координатних ліній) розміщують монтажні та перехідні отвори. За основний крок координатної сітки приймають 0,5 мм в обох напрямках. Якщо цей крок не задовольняє вимогам конкретної конструкції, можна застосувати крок, що дорівнює 0,05 мм. При використанні мікросхем і елементів з кроком виводів 0, 625 мм допускають використання саме такого кроку сітки. При необхідності використання координатної сітки з кроком відмінним від основних, надають перевагу величині кроку кратній основним величинам кроку.

При використанні мікросхем зарубіжного виробництва з відстанями між виводами у дюймовій системі, допускають використання кроку координатної сітки кратного 2,54 мм.

Діаметри монтажних та перехідних отворів повинні відповідати ГОСТ 10317-79 і належати до ряду:

0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 3,0 мм.

Монтажні отвори призначені для встановлення мікросхем та електрорадіоелементів, а перехідні – для електричного зв'язку між шарами або сторонами ДП.

Співвідношення між лінійними розмірами сторін ДП повинно складати не більше, ніж 3:1.

16.2 Електричні характеристики друкованих плат

Допустима густина струму для одно, двосторонніх ДП і зовнішніх шарів багатшарових ДП 20 А/мм², а для внутрішніх шарів – становить 15 А/мм².

Допустима робоча напруга між елементами провідного рисунка залежить від матеріалу основи ДП і не повинна перевищувати значень, наведених у таблиці 16.2, 16.3.

В БМА для рухомих об'єктів отримують поширення рельєфні плати, які отримали свою назву через рельєфну форму провідників, що мають у перерізі форму трапеції (рис.16.4).

Таблиця 16.2

Допустимі робочі напруги для матеріалів ДП

Відстань між елементами рисунка, мм	Значення робочої напруги, В	
	Гетинакс фольгований (ГФ)	Склотекстоліт фольгований (СФ)
Від 0,1 до 0,2 включно	–	25
Вище ніж 0,2 до 0,3 включно	–	50
Вище ніж 0,3 до 0,4 включно	75	100
Вище ніж 0,4 до 0,5 включно	150	200
Вище ніж 0,5 до 0,75 включно	250	350
Вище ніж 0,75 до 1,5 включно	350	500
Вище ніж 1,5 до 2,5 включно	500	650

Таблиця 16.3

Допустимі робочі напруги між елементами провідного рисунка на зовнішніх шарах ДП

Відстань між елементами провідного рисунка, мм	Значення робочої напруги, В							
	Нормальні умови		Відносна вологість 93 % при 40 °С		Понижений атмосферний тиск			
					53600 Па (400 мм рт. ст.)		666 Па (5 мм рт. ст.)	
	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ
0,1–0,2	-	25	-	15	-	20	-	10
0,2–0,3	30	50	20	30	25	40	20	30
0,3–0,4	100	150	50	100	80	110	30	50
0,4–0,7	150	300	100	200	110	160	58	80
0,7–1,2	300	400	230	300	160	200	80	100
1,2–2,0	400	600	300	360	200	300	100	130
2,0–3,5	500	830	360	430	250	400	110	160
3,5–5,0	660	1160	500	600	330	560	150	210
5,0–7,5	1000	1500	660	830	500	660	200	250
7,5–10	1300	2000	830	1160	560	1000	230	300
10,0–15,0	1800	2300	1160	1600	660	1160	300	330

Така конструкція друкованого провідника суттєво підвищує надійність плат в експлуатації та стійкість до перепаювання (до 50 разів) за рахунок високої міцності зчеплення шару міді з основою. У таких платах металізовані монтажні отвори мають форму як на рис. 16.3, б, що дає змогу відмовитися від контактних площинок.

Доріжки рельєфної плати у 2-3 рази вужчі порівняно зі звичайним друкованим провідником. Відсутність контактних площинок і мала ширина провідників дають можливість виготовляти двосторонні рельєфні плати підвищеної щільності монтажу, еквівалентні 5-14-шаровим друкованим платам і розміщувати чотири проводи між отворами діаметром 0,8 мм відстанню між центрами 2,5 мм.



Рисунок 16.4. Елементи рельєфної плати (а – друкований провідник; б – отвір)

Ортогональне розміщення провідників на сторонах ДП дає можливість формувати перехідні отвори у будь-якій точці перетину трас, що скорочує електричні зв'язки, знищує рівень завад і паразитні зв'язки.

Переваги рельєфних ДП:

- можливість виконання монтажу надвисокої щільності;
- високий клас точності;
- можливість використання технології поверхневого монтажу;
- порівняно низька трудоемність за рахунок простого алгоритму трасування;
- висока експлуатаційна надійність;
- нижча вартість кращих за параметрами, порівняно з склотекстолітом, полімерних матеріалів основи (наприклад, епоксидна пластмаса);
- відсутність екологічно шкідливих екологічних процесів нанесення провідного рисунка.

Для виготовлення основи ДП використовують: кераміку, фольговані та нефольговані діелектрики (гетинакс, текстоліт, склотекстоліт, лавсан, склотканина, поліамід, фторопласт та ін.), металеві пластини. При виборі матеріалу беруть до уваги передбачувані механічні впливи, клас точності, умови експлуатації, вартість та ін.

Діелектрична основа плати – це, зазвичай, паперова (гетинакси) або текстильна основа, просочена фенольною чи епоксидною смолою.

Перевагою гетинаксів є те, що вони легко піддаються механічній обробці, що є важливим при серійному та масовому виробництві. Їх недолік – підвищена чутливість до вологості і нестабільність розмірів (прогини та ін.).

У склотекстолітах як основу використовують склотканину, просочену епоксидною смолою. Цей матеріал якісніший за гетинакс має кращі механічні та електричні характеристики, вищу стійкість до нагріву, менше вологопоглинання, але дорожчий і його важче обробляти (швидко затуплює ріжучі краї інструментів). Крім того, суттєва різниця (близько 10 разів) між коефіцієнтом теплового розширення міді і склотекстоліту в напрямі в глибину матеріалу може призводити до розриву металізації отворів при пайці або в процесі експлуатації.

Фольговані діелектрики – це електроізоляційні основи, покриті, як правило, мідною фольгою з окисдованим гальваностійким шаром, який прилягає до електроізоляційної основи. Вони можуть бути одно та двосторонніми.

Нефольговані діелектрики призначені для адитивного методу виробництва плат, мають на поверхні спеціально нанесений адгезивний шар, призначений для кращого зчеплення хімічно осадженої міді з діелектриком.

Для основ багатошарових ДП теж використовують різні діелектричні матеріали: склотекстоліт, поліамід та ін. А для виготовлення гнучких ДП та гнучких друкованих кабелів застосовують фольгований лавсан, фторопласт, поліамід та ін. Двосторонні ДП на металевій основі з нанесеним на неї електроізоляційним покриттям використовують у тих випадках, коли треба забезпечити відведення тепла при розміщенні на платі тепло навантажених компонентів: напівпровідникових пристроїв і потужних інтегральних мікросхем. Ці матеріали мають велику механічну міцність.

При підвищених вимогах до стабільності параметрів використовують керамічні плати. На поверхню таких плат наносять провідні та резистивні пасти і вплавають їх при температурі 600...700⁰С.

Розглянемо критерії вибору ДП як монтажних основ (підложок) для компонентів.

1. Щільність монтажного поля. Розмір контактних площинок для монтажу та зазорів між ними багато в чому визначають складові технології збірно-монтажного виробництва.
2. Розміри групової заготовки, яку необхідно встановити на конвеєр збірно-монтажної лінії.
3. Система базування з реперними знаками заготовки та прицілами для встановлення компонентів із багатьма выводами на робочому полі плати. Форма та точність позиціонування повинні бути узгоджені між виробниками ДП і збірно-монтажним виробництвом.
4. Кінцеве покриття під пайку визначає вибір флюсів, паст, температурні режими пайки. Тривала здатність кінцевих покриттів до пайки – одна з основних умов стійкості збірно-монтажного виробництва.
5. Короблення друкованих плат. Часто ДП бракують через неприйнятне

короблення, яке не дає можливості набуті платі плоского стану, який необхідний для установника компонентів.

6. Нагрівостійкість ДП визначає прийнятність температурних режимів пайки. Для безсвинцевої пайки підходять матеріали з температурою застигання 150⁰С і вище. Це матеріали групи FR-4, FR-5 (див. ДОДАТОК), як правило, епоксидна смола, армована склотканиною та поліаміди.

Особливо критичною є поведінка матеріалу основи при гарячій обробці HASL. HASL-процес полягає в зануренні плат на певний час у ванну з гарячим припоєм. Під час швидкого виймання плат їх обдувають струменем гарячого повітря, який здуває залишки припою і вирівнює покриття. Проте напливи припою можуть залишатися і в подальшій зборці заважатимуть встановленню дрібних компонентів, що обмежує використання цього покриття. Проте з точки зору якості це покриття найкраще. Ще одним з недоліків цього процесу є жорсткий термоудар, під який потрапляють плати в процесі занурення в гарячий припой. Чим вища температура припою, тим серйознішою є проблема забезпечення надійності міжз'єднань. Тому цей процес не завжди використовують для багат шарових плат.

7. Нанесення паяльної маски: точність суміщення з монтажним полем, наявність маски в зазорах між монтажними елементами, відсутність «наповзання» маски на контактні площинки, що впливає на якість пайки. Стійкість паяльної маски до нагрівання та вологи впливає на подальші характеристики стійкості друкованого вузла до впливу зовнішніх факторів.
8. Конфігурація монтажних елементів на платі повинна бути придатна для групових методів пайки.

16.3 Об'ємний і поверхневий монтаж

При розміщенні операційних підсилювачів у корпусах типу DIP і пасивних компонентів з дровими виводами, для їх монтажу на ДП необхідні перехідні отвори. Такі компоненти використовують тоді, коли немає особливих вимог до розмірів плати. Такі компоненти коштують дешевше, але зростає вартість ДП через необхідність свердління додаткових отворів під виводи компонентів.

Крім того, при використанні навісних компонентів збільшуються розміри плати і довжина проводів, що не дає можливості схемі працювати на високих частотах. Перехідні отвори мають власну індуктивність, що також накладає обмеження на динамічні характеристики схеми. Тому навісні компоненти не рекомендують застосовувати для реалізації високочастотних схем або для аналогових схем, розміщених поблизу від високошвидкісних логічних схем.

Деякі розробники прагнучи зменшити довжину проводів, розміщують резистори вертикально. На перший погляд може здатися, що це скорочує довжину траси. Проте при цьому збільшується шлях проходження струму по резистору, а сам резистор являє собою петлю (виток індуктивності). Випромінююча та сприймаюча здатність різко зростає.

При поверхневому монтажі немає необхідності розміщувати отвір під кожним виводом компонента, проте виникають проблеми при тестуванні схеми і доводиться використовувати перехідні отвори як контрольні точки, особливо при використанні компонентів малих типорозмірів.

Кожен раз, коли при розводці друкованої плати виникає необхідність у створенні перехідного отвору, тобто міжшарового з'єднання (рис. 16.5) необхідно пам'ятати, що при цьому виникає паразитна індуктивність. При діаметрі отвору після металізації d і довжині каналу h індуктивність можна обчислити за наближеною формулою.

$$L \approx \frac{h}{5} \cdot \left(1 + \ln \left(\frac{4h}{d} \right) \right) \text{ [нГн]}$$

Наприклад, при $d = 0,4$ мм і довжині каналу $h = 1,5$ мм (досить поширені величини) індуктивність отвору дорівнює 1,1 нГн.

Слід мати на увазі, що індуктивність отвору разом з такою ж паразитною ємністю формують резонансний контур, що може датися взнаки при роботі на високих частотах. Власна індуктивність отвору досить мала і резонансна частота знаходиться приблизно в гігагерцовому діапазоні, але якщо сигнал проходить через кілька перехідних отворів, то їх індуктивності додаються (послідовне з'єднання), а резонансна частота знижується. Тому слід уникати великої кількості перехідних отворів при розводці важливих височастотних провідників аналогових схем. Крім того, можуть виникати петлеві ділянки, тому найкраща аналогова розводка, коли всі сигнальні проводи розміщуються на одному шарі ДП.

Інші паразитні ефекти можуть бути пов'язані з недосить чистою поверхнею плати. Тому, якщо в схемі наявні великі отвори, то особливу увагу треба приділити очищенню плати.

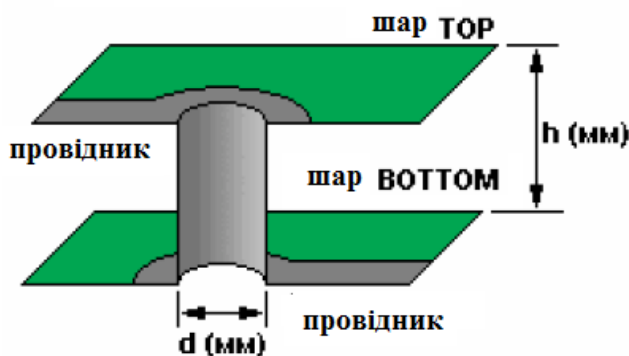


Рисунок 16.5. Індуктивність перехідного отвору

16.4. Безпосередній монтаж кристалів на основу

Потреби в зменшенні маси та габаритів конструкцій електронної апаратури зумовили інтерес до методів безпосереднього монтажу кристалів мікросхем на друкованій платі DCA (Direct Chip Attach): «Кристал на платі» – COB (Chip-on-Board), «Кристал на склі» – COG (Chip-on-Glass), «Кристал на полімері» – COF (Chip-On-Flex) і, якщо їх багато на одній основі «Багатокристалльні модулі» – MCM (Multi-Chip-Module).

16.5 Зборка та монтаж модулів першого рівня

У радіoeлектронній апаратурі виділяють чотири основних і два додаткових рівня модульності. Ієрархію модулів показано на рис. 16.6.

Модулем нульового рівня є електронний компонент (електрорадіоелемент або мікросхема.)

Модуль першого рівня – являє собою ДП із встановленими на ній модулями нульового рівня та електричними з'єднувачами (модуль, комірка).

Модуль другого рівня – блок, основними конструктивними елементами якого є панель з відповідними з'єднувачами модулів першого рівня. Міжблокова комутація виконується за допомогою з'єднувачів, розміщених по периферії панелі блоку. Модулі першого рівня розміщують в один або кілька рядів. На рис. 16.6 показано однорядний блок.

Модуль третього рівня – стійка, в якій встановлено блоки.

Модуль 0,5 рівня є мікрозборка, яка складається з основи з розміщеними на ній без корпусними мікросхемами. Міжмодульна комутація забезпечується розміщенням по периферії основи контактних площинок.

Модуль рівня 2,5 – це рама, в якій розміщують 6-8 блоків.

Модульний принцип конструювання передбачає кілька рівнів комутації:

1-й рівень – комутація друкованим і (або) провідним монтажем електронних компонентів на платі;

2-й рівень – комутація друкованим або об'ємним монтажем відповідних з'єднувачів модулів першого рівня в блоці;

3-й рівень – електричне об'єднання блоків або рам у стійці і стійок між собою джгутами та кабелями;

рівень 0,5 – електричне з'єднання виводів без корпусних мікросхем плівковими проводами;

рівень 2,5 – комутація блоків у рамі проводами, джгутами або кабелями.

При розробці нескладної апаратури вищі рівні модульності відсутні.

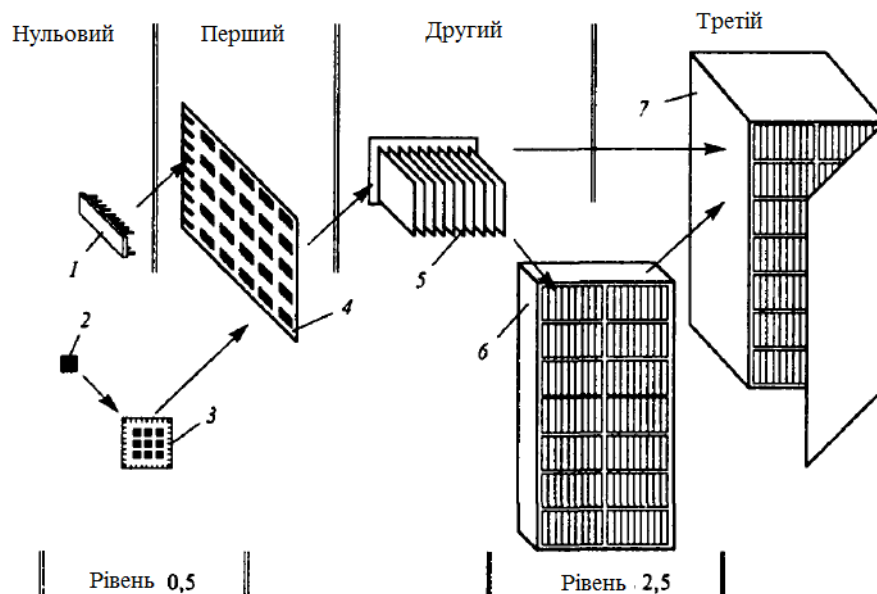


Рисунок 16.6 Конструктивна ієрархія модулів (1 – мікросхема; 2 – без корпусна мікросхема; 3 – мікрозбірка; 4 – модуль, комірка; 5 – блок; 6 – рама; 7 – стійка.)

Одностороння, двостороння або багатошарова друкована плата – це основний конструктивний елемент, який є в основі модуля першого рівня (модулі, комірки), з одного або з обох сторін якої встановлюють вироби електрорадіотехніки (ВЕТ), елементи комутації та ін.. Кількість компонентів, які треба встановити на ДП може досягати десятків або сотень штук. Залежно від виду зовнішніх виводів компонентів їх монтаж на поверхню ДП поділяють на штирковий, планарний та поверхневий (рис.16.7)

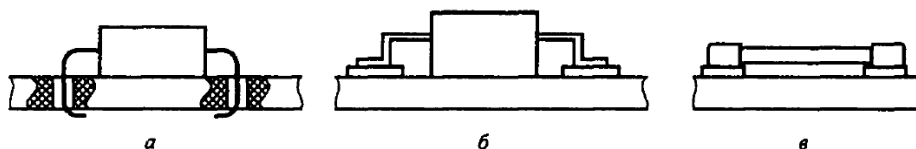


Рисунок 16.7. Види встановлення компонентів на плату (а – штирковий, б– планарний, в – поверхневий)

Установлення компонентів на ДП здійснюють ручним, механізованим, напівавтоматичним або автоматичним методом.

ДОДАТОК

Таблица 1

Категория	Компоненты, комментарии
FR-1	бумага, фенольная композиция: прессование и штамповка при комнатной температуре, высокий коэффициент гигроскопичности
FR-2	бумага, фенольная композиция: применимый для односторонних печатных плат бытовой техники, невысокий коэффициент гигроскопичности
FR-3	бумага, эпоксидная композиция: разработки с хорошими механическими и электрическими характеристиками
FR-4	стеклоткань, эпоксидная композиция: прекрасные механические и электрические свойства
FR-5	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокая прочность при повышенных температурах, отсутствие воспламенения
G10	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокие изоляционные свойства, наиболее высокая прочность стеклоткани, низкий коэффициент гигроскопичности
G11	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокая прочность на изгиб при повышенных температурах, высокая сопротивляемость растворителям

1. Каленкович Н.И. Радиоэлектронная аппаратура и основы ее конструкторского проектирования: учебно-методическое пособие / Н.И. Каленкович и др. – Минск: БГУИР, 2008. – 200 с. : ил.

2. А. М. Медведев Сборка и монтаж электронных устройств – Москва: Техносфера, 2007. – 256 с.

3. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др. Под общ. ред. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.: ил.

Лекція 17

Методики виконання заземлення в БМА. Вплив електричних з'єднань на параметри БМА.

17.1 Методики виконання заземлення в БМА

Заземлення – це провід або декілька проводів, що розміщені у землі або на поверхні землі з метою встановлення електричного з'єднання між пристроєм та землею. Заземлення як власне дія це — навмисне електричне з'єднання будь-якої точки електричної мережі, електроустановки чи обладнання, із заземлюючим пристроєм.

Усі види заземлення за функціями, які вони виконують можна об'єднати у три групи: захисне заземлення, робоче (функціональне) заземлення та заземлення блискавкозахисту.

Захисне заземлення (англ. *protective earthing*) — заземлення точки або точок у системі чи в процесі монтажу системи або в обладнанні, з метою забезпечення електробезпеки. Захисне заземлення — це спеціальне електричне сполучення із землею або її еквівалентом струмопровідних елементів обладнання, які не повинні перебувати під напругою, але в процесі експлуатації можуть опинитися під напругою, наприклад, у разі пошкодження ізоляції, в аварійних випадках тощо. Захисне заземлення є простим, ефективним і поширеним способом захисту людини від ураження електричним струмом при дотику до металевих поверхонь, які виявились під напругою. Це забезпечується зниженням напруги між обладнанням, що виявилось під напругою, і землею до безпечної величини.

Конструктивними елементами заземлювального пристрою захисного заземлення є: заземлювачі (металеві проводи, що знаходяться в землі) і заземлювальні проводи (з'єднують із заземлювачем обладнання, що заземлюється).

Робоче заземлення (англ. *operational earthing*) або **функціональне заземлення** (англ. *functional earthing*) — не пов'язане з електробезпекою навмисне з'єднання з землею окремих точок електричного кола, наприклад нейтральних точок обмоток генераторів, силових і вимірювальних трансформаторів, а також фази при використанні землі як фазного або зворотного проводу. Робоче заземлення призначене не для захисту, а, у першу чергу, для забезпечення належної роботи (наприклад, для забезпечення електромагнітної сумісності, фільтрування шумів у радіоапаратурі тощо) електроустаткування в нормальних або аварійних умовах і здійснюється

безпосередньо (шляхом з'єднання провідником частин, що заземлюються із заземлювачем) або через спеціальні апарати — пробивні запобіжники, розрядники, резистори тощо.

Заземлення блискавкозахисту — навмисне з'єднання із землею блискавкоприймачів і розрядників з метою відведення від них струмів блискавки в землю у засобах блискавкозахисту. Реалізується у вигляді *заземлювача* — провідної частини або сукупності з'єднаних між собою провідних частин, що перебувають в електричному контакті із землею безпосередньо або через проміжне провідне середовище, наприклад, бетон.

При проектуванні засобів заземлення часто доводиться шукати компроміс між тим, що суперечить одне одному. Заземлююча система повинна: бути колом опорного джерела напруги (у типовому випадку ± 100 мВ для аналогових схем і ± 200 мВ для цифрових); забезпечувати сигнальні і силові зворотні кола; утворювати опорні площини для антен; перешкоджати появі поблизу антен високочастотних потенціалів; захищати людей і устаткування від грозових розрядів; захищати людей і устаткування від несправностей у колах джерел живлення; знімати статичні заряди.

Заземлююча система повинна бути ретельно спроектована, щоб задовольняти всім цим вимогам і одночасно звести до мінімуму небажані паразитні зв'язки між сигналами, які призводять до виникнення завад.

Заземлення *«має низький імпеданс кола повернення струму»*. З цього виходить, що протікання будь-якого струму в системі заземлення призведе до різниці потенціалів. Для задовільної роботи устаткування необхідно, щоб ця різниця потенціалів була невелика порівняно з амплітудою сигналів. Тому при проектуванні системи заземлення слід: 1) *підтримувати імпеданс заземлення на якомога нижчому рівні*; 2) *контролювати струм, що протікає між джерелами і навантаженнями*.

Які повинні бути розміри системи заземлення? Якщо сигнал частотою f [Гц] з довжиною хвилі $\lambda = 2,998 \cdot 10^8 / f$ [м] поширюється вздовж ділянки проводу довжиною l [м], то імпеданс рівний $|Z| = (R^2 + (2\pi f L)^2)^{1/2} |z|$ [Ом]. Опір R [Ом] залежить від довжини, ефективного поперечного перерізу і питомого опору провідника, а індуктивність L [Гн] — від довжини, ефективного перерізу, магнітної проникності та форми провідника. Крім того, на індуктивність впливають розміщені поблизу металеві елементи конструкції та кола зворотного струму.

Проте для врахування стоячих хвиль слід ввести у вираз для імпедансу поправку $\text{tg}(2\pi l/\lambda)$, так що імпеданс проводу буде дорівнювати:

$$|Z| = [1 + \text{tg}(2\pi l/\lambda)] [Om] .$$

У двох точках проводу, віддалених на відстань $\lambda/4$, $3\lambda/4$, $5\lambda/4$, $7\lambda/4$... один від одного, коло як би розмикається.

Тому, для того щоб понизити різницю потенціалів, необхідно обмежити розмір системи заземлення. Для чутливих пристроїв максимальна відстань між точками заземлення не повинна перевищувати $0,5\lambda$, де λ – довжина хвилі найбільш високочастотного сигналу. При цьому імпеданс заземлюючого кола складає 133% номінального значення. У більшості пристроїв цивільного призначення допустима відстань $0,1\lambda$ (173% номінального значення імпедансу), а при заземленні нечутливих пристроїв цю відстань можна збільшити до $0,15\lambda$; при цьому імпеданс заземлюючої системи зростає до 238 % номінального значення. Можна ізолювати один від одного кола повернення сигнальних струмів (сигнальна або схемна земля), кола повернення постійних струмів живлення (силова земля) і кола повернення змінних струмів живлення (корпусна земля або захисне заземлення) і побудувати систему заземлення з трьох незалежних контурів (рис. 17.2), які сходяться в одній точці.

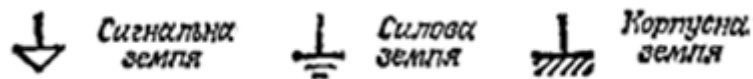


Рисунок 17.2. Стандартні позначення заземлення.

Такий підхід дозволяє оптимізувати кожне заземлююче коло окремо.

Наприклад, кола заземлення схем поширення сигналів у діапазоні частот до декількох мегагерц повинні мати низький імпеданс і по них повинен текти малий струм.

Заземлююче коло джерел живлення постійного струму повинно бути розраховано на низький імпеданс, але значно вищий струм, а заземлення джерел живлення по мережі змінного струму (корпусна земля) повинні мати низький імпеданс поблизу частоти 100 Гц і витримувати струм в сотні ампер (у типовому випадку проводи кола заземлення, повинні мати опір ≤ 100 мОм і індуктивність ≤ 100 мкГн; цим умовам задовольняють мідний дріт діаметром 2,053 мм і алюмінієвий дріт діаметром 2,588 мм).

На рисунку 17.3 показано аналогову схему з плаваючим заземленням (1), яка використовується для надзвичайно чутливих пристроїв.

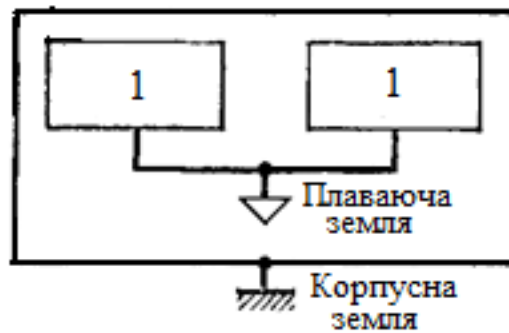


Рисунок 17.3. Схема з плаваючим заземленням.

Така заземлююча система вимагає повної ізоляції схеми від корпусу (високого опору і низької ємності), інакше вона виявляється малоефективною. Як джерела живлення схем можуть використовуватися сонячні елементи або батареї, а сигнали повинні надходити на схему і виходити з неї через трансформатори або оптрони. Для запобігання накопичення статичних зарядів, деякі проектувальники поміщають шунтуючий резистор навантаження з високим опором між точками сигнального з і корпусного заземлення.

На рис. 17.4 показана схема заземлення, в якій реалізовано принцип заземлення в одній (спільній) точці. Кожна окрема схема і кожен екран мають своє відведення до спільної точки. Кожна основа або кожна стійка з'єднуються з монтажною панеллю за допомогою одного проводу. При такому підході виключається паразитний зв'язок через загальний імпеданс і зменшується ймовірність утворення низькочастотного паразитного контуру із замиканням на землю. Заземлення в спільній точці дуже ефективно для частот 1 МГц, а якщо система заземлення має малий розмір (не більш 0.05λ), частотна межа може досягти 10 МГц. Проте чутливі аналогові схеми можуть сприймати завади внаслідок індуктивного і ємнісного паразитних зв'язків, не дивлячись на численні дрти заземлення.

На рис. 17.4 показано модифіковану систему заземлення в спільній точці. Схеми з близьким рівнем завад сполучені разом, причому найбільш чутливі схеми розташовані якомога ближче до спільної точки.

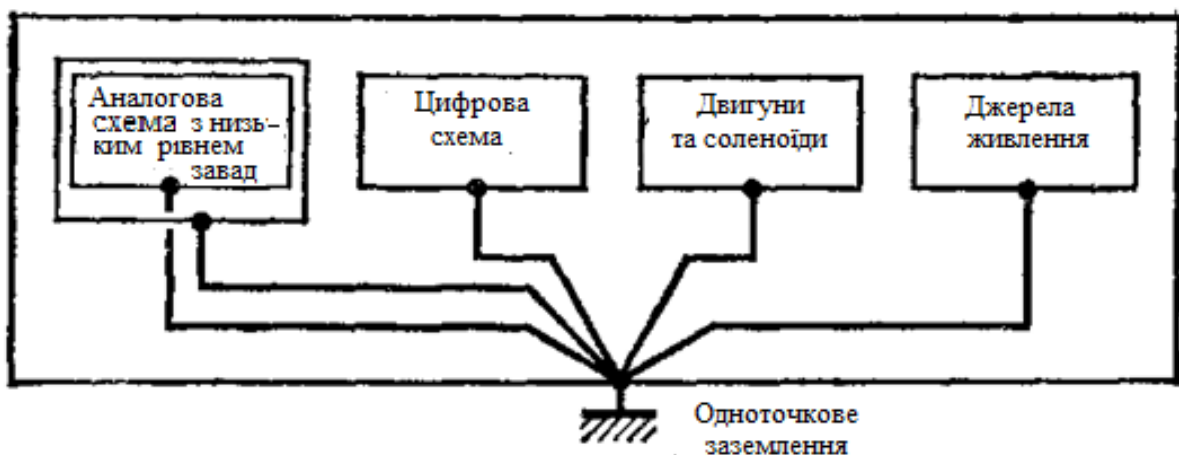


Рисунок 17.4. Одноточкова система заземлення.

Такий принцип заземлення зменшує загальне число необхідних проводів заземлення, трохи підвищуючи при цьому паразитний зв'язок через загальний імпеданс. Коли друкована плата має окремі заземлюючі кола для аналогових і цифрових вузлів, їх слід з'єднати по зустрічно-паралельній схемі (діоди CR1 і CR2 на рис. 17.5) для захисту друкованої плати від статичної електрики, коли вона не встановлена в систему.

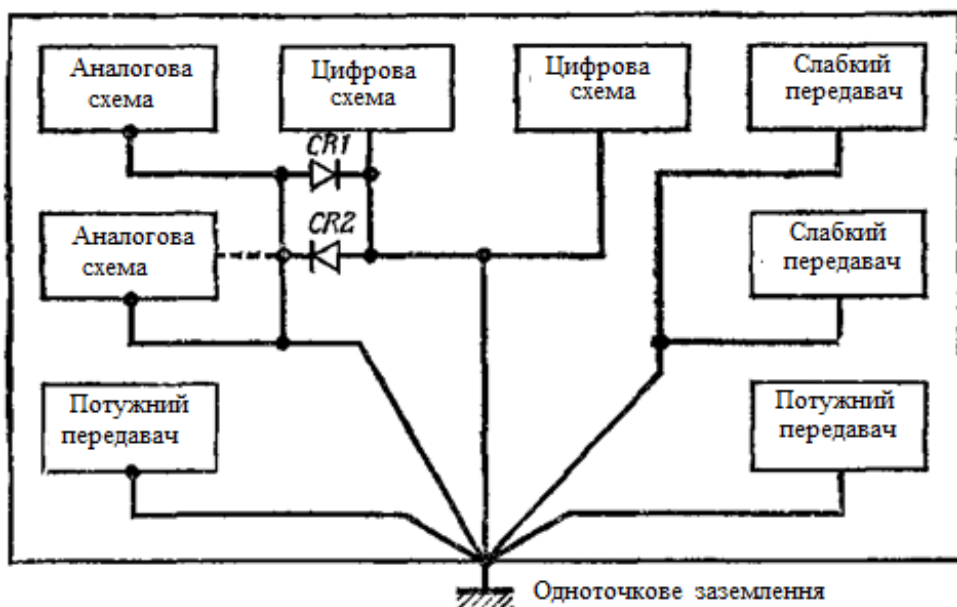


Рисунок 17.5. Модифікована одноточкова система заземлення

На рисунку 17.6 показано багатоточкову систему заземлення. Окремі схеми і ділянки корпусу з'єднані численними короткими ($l < 0,1\lambda$) перемичками, щоб звести до мінімуму стоячі хвилі. Подібний метод зазвичай застосовують для високочастотних схем ($f \geq 10$ МГц) з близьким рівнем завад. Така заземлююча система вимагає ретельного контролю, створює численні паразитні контури із замиканням на землю і її не рекомендується використовувати для чутливих схем.

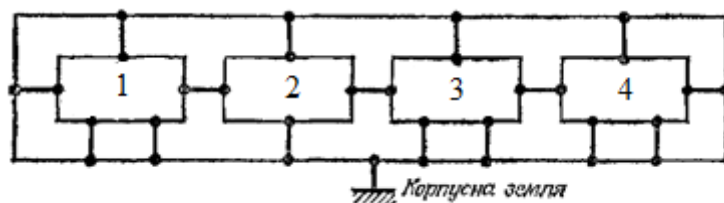


Рисунок 17.6. Багатоточкова система заземлення

(1—аналогова схема з низьким рівнем сигналу; 2—цифрова схема; 3—двигуни та соленоїди; 4—джерела живлення).

На рисунку 17.7 наведено комбіновану заземлююча систему, яка враховує одноточкову, багатоточкову і плаваючу заземлюючі системи. На рис. 17.7, *а* показано схему заземлення із спільною точкою у поєднанні з багатоточковим заземленням цифрових логічних ІС (структура, що часто зустрічається). На рисунку 17.7, *б* котушка індуктивності (з індуктивністю $\approx 1\text{мГн}$) служить розв'язкою між високочастотними схемами і корпусом, одночасно забезпечуючи стікання статичних зарядів. На рис. 17.7, *в* конденсатори, віддалені один від одного на відстані $0,1\lambda$ уздовж ізолюваного кабелю, запобігають появі високочастотних стоячих хвиль і низькочастотних паразитних контурів із замиканням на землю. При використанні двох останніх варіантів заземлення необхідно бути дуже уважним, щоб виключити резонансні явища в заземлюючій системі, які можуть виникнути в результаті наявності в ній паразитних ємностей та індуктивностей.

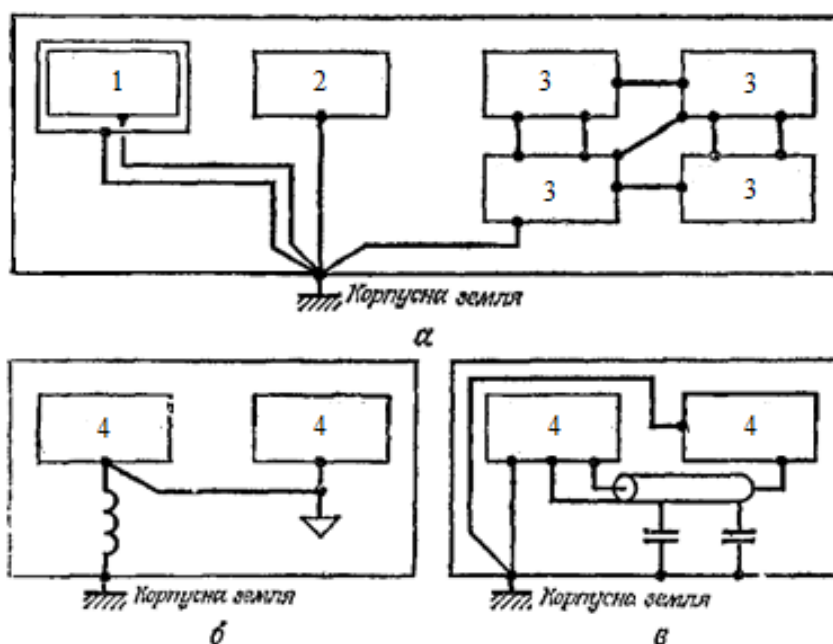


Рисунок 17.7. Комбіновані системи заземлення (1 – аналогова схема з низьким рівнем сигналу; 2 – передавач; 3 – цифрова схема; 4 – високочастотна аналогова схема)..

Дуже поширеним і таким, що в той же час вимагає надзвичайно багато клопоту є заземлення у вигляді гірлянди. При використанні такої схеми заземлення проблеми завад можна ослабити, якщо кола з високим рівнем завад розташувати в одній гірлянді, а чутливі кола - в іншій. У тій гірлянді, де знаходяться кола з високим рівнем завад, послідовність розташування така: кола з незначним рівнем завад – з вищим рівнем завад – з максимальним рівнем завад – корпус. Порядок розташування кіл в тій гірлянді, де завади відсутні, наступний: чутливі схеми – чутливіші схеми –, найчутливіші схеми – корпус.

При заземленні чутливих аналогових схем необхідно ретельно контролювати струми по контурах заземлення. На рис. 17.8, *а* показана схема

ОП, в якій, як коло повернення сигналу використовується заземлення джерела живлення постійного струму. У такій схемі завади можуть виникати унаслідок паразитного індуктивного зв'язку і зв'язку через загальний імпеданс. Додавши лінію повернення струму сигналу і два шунтуючі конденсатори (рис. 17.8, б), можна зменшити площу контуру, що охоплюється сигналом, і тим самим ослабити індуктивний паразитний зв'язок, крім того, при цьому ослабляється і зв'язок через загальний імпеданс, оскільки контури повернення сигналу і джерела живлення розділяються.

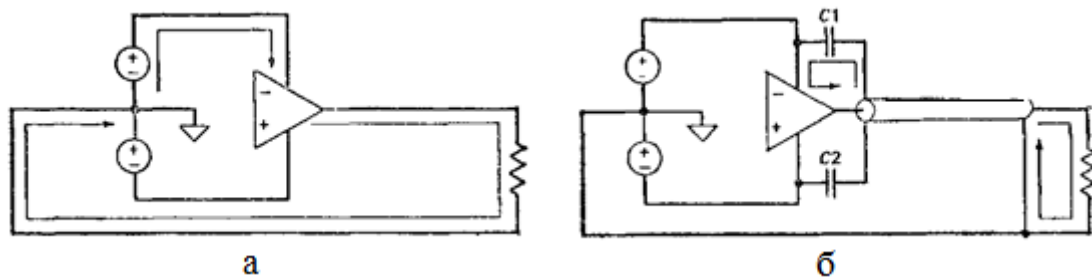


Рисунок 17.8. Використання шунтуючих конденсаторів і спеціальних ліній повернення струму сигналу для зменшення площі струмових контурів.

Цифрові схеми нечутливі до низькочастотних завад, проте на високих частотах їх заземлюючі кола повинні мати низький імпеданс. Цій умові цілком відповідають передавальні лінії з розподіленими параметрами. Скручені пари проводів і коаксіальні кабелі забезпечують кожному сигналу одну лінію повернення, тоді як у плоских кабелях принаймні кожен 5-й або 10-й провідник повинен використовуватися для повернення сигналу. Ці лінії повернення слід заземляти поблизу передавальних пристроїв і приймачів.

Друковані плати з цифровими ІС повинні мати заземлюючі площини або спеціальну заземлюючу сітку (рис. 17.9), щоб забезпечити низький імпеданс сигнальної (схемної) землі на високих частотах.

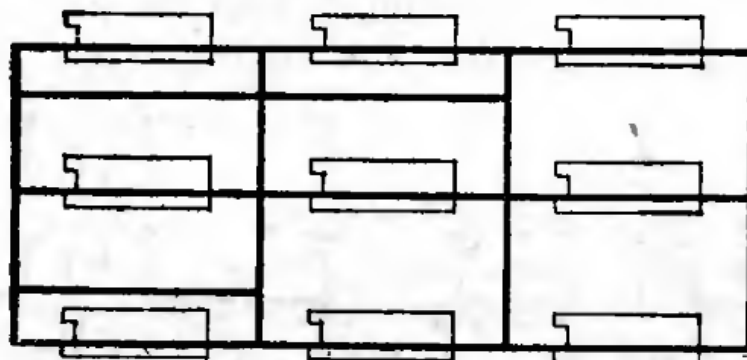


Рисунок 17.9. Заземлююча сітка

Майже 40% площі заземлюючої площини можна відвести на розводку сигнальних кіл і кіл живлення; при цьому імпеданс сигнальної землі зростає дуже мало. Контактні площинки заземлюючих і силових схем бажано робити якомога ширшими, проте навіть вузькі контактні площинки заземлення сприятимуть зменшенню імпедансу заземлення.

Якщо два провідники з індуктивностями $L1$ і $L2$ і взаємною індуктивністю M з'єднати паралельно, загальна індуктивність дорівнюватиме:

$$L = (L1 \cdot L2 - M^2) / (L1 + L2 - 2M) \text{ [Гн]}.$$

У тому випадку, коли відстань між провідниками принаймні втричі перевищує їх діаметр, $M \leq L1$ і $M \leq L2$, **тобто** загальна індуктивність буде приблизно удвічі меншою. По суті, при високих частотах два провідники поведуться як один провідник, що охоплює обидва початкових провідники.

Так якщо з'єднати паралельно дві контактні площинки шириною 0,254мм, відстань між якими складає 7,68 мм, результуючий імпеданс буде приблизно дорівнює імпедансу однієї площинки шириною 8,188 мм. Саме тому заземлюючі сітки мають практично такий же імпеданс, як суцільна заземлююча площа.

Екрани необхідно заземляти для нейтралізації впливу електричних полів, при чому заземлюючі провідники слід розташовувати поблизу від вхідних або вихідних контактів сигнальної лінії (рис. 17.10, а) для зменшення струму, який протікає по екрану. Для запобігання виникнення паразитних контурів, із замиканням на землю, екрани навколо чутливих схем слід заземляти тільки в одній точці. Екрани кабелів необхідно заземляти принаймні через кожні $0,2\lambda$ для придушення стоячих хвиль.

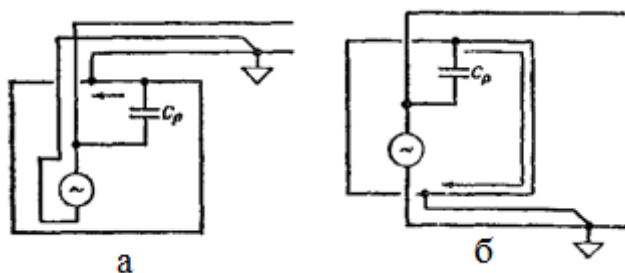


Рисунок 17.10. Розташування провідників, що заземляють екрани: а - правильне, б - неправильне.

Провідники, що заземляють корпус, повинні мати малий імпеданс при високому струмі і повинні бути доступні для профілактичного огляду. Довжина перемичок, що сполучають корпус із захисною землею, і відстань між ними повинні бути менше $0,1\lambda$ (але не більше 0,2 м). Перемички заземлення на корпусі слід розташовувати далеко від чутливих схем.

Паразитні контури в колах заземлення сприймають завади унаслідок індуктивного зв'язку і їх найлегше розірвати поблизу навантаження. Якщо навантаження підключене до декількох джерел живлення, паразитний контур слід розірвати поблизу джерел. На рис. 17.11 показано три способи розриву паразитних контурів у колах заземлення.

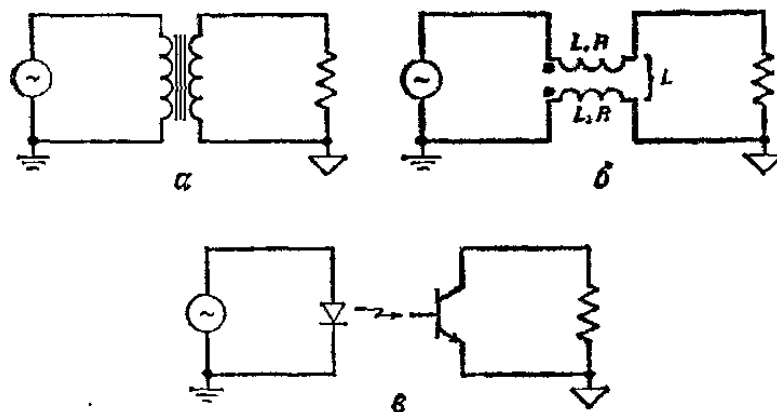


Рисунок 17.11. Способи розриву паразитних контурів в колах заземлення: *а* - за допомогою трансформаторів, *б* - за допомогою дроселів, що працюють в синфазному режимі, *в* - за допомогою оптронів.

Трансформатори (рис. 17.11, *а*) забезпечують задовільну розв'язку аж до частот 5-10 МГц. Для надійнішої розв'язки слід використовувати трансформатор з електростатичним екрануванням, причому екран повинен бути заземлений поблизу навантаження. Дроселі в синфазному режимі (рис. 17.11, *б*) забезпечують розв'язку на частотах, що перевищують, $5R/(2\pi l)$ [Гц], де R в омах, а L в генрі. Простий спосіб виготовлення дроселя, що працює в синфазному режимі, полягає в пропусканні кабелю через кільцевий сердечник. Опторони задовільно виконують свої функції в діапазоні частот від нуля до декількох мегагерц (рис. 17.11, *в*). Стандартні оптрони розраховані на номінальну синфазну напругу 1,5-7 кВ і їх паразитна ємкість не повинна перевищувати 2 пФ, тоді як у екранованих оптронів вона повинна бути понижена до 0,5 пФ.

17.2 Вплив електричних з'єднань на параметри БМА.

Якісні контактні з'єднання провідників необхідні для формування стабільних однорідних струмових шляхів з якомога меншим опором. Якісні контакти в низькочастотних схемах повинні мати опір $\leq 0,5$ мОм та індуктивність ≤ 25 нГн, а для високочастотних схем аж до 20 МГц імпеданс контактів не повинен перевищувати 80 мОм. Найкращі контакти отримують при безпосередньому суцільному однорідному з'єднанні двох металів, отриманому зварюванням, високотемпературною пайкою, екзотермічним

приєднанням, пайкою сріблом або пайкою, при якій довжини шва перевищує перекриття провідників.

Трохи гірші за якістю контакти, отримані компресією двох металів. Контакти досить задовільної якості одержують при з'єднанні металів з провідним покриттям. Ці контакти, як правило, мають опір порядку кількох міліом і їх імпеданс на частоті 1 МГц перевищує 1 Ом.

На метали можна нанести кадмій, олово, срібло та деякі сплави.

Якщо виникає небезпека порушення контакту, шви можна ущільнити за допомогою провідних паст.

Для здійснення контакту між з'ємними модулями або модулями, які мають амортизаційні підвіски, необхідно використовувати суцільні металеві перемички, обплетення або дріт. Їх необхідно розміщувати таким чином, щоб вони були доступні для огляду і одночасно захищені від випадкових пошкоджень, витримуючи при цьому між ними необхідні відстані. Перемички повинні бути короткими і широкими із співвідношенням довжини до ширини 5, а ще краще 3, для того, щоб імпеданс був мінімальним.

Заземлюючі перемички в жодному разі не можна з'єднувати послідовно. Суцільні мідні перемички повинні мати товщину менше 0,1 мм і ширину більше 30 мм, а товщина перемичок з алюмінію не повинна перевищувати 0,2 мм. Оплетення є значно гнучкішими, проте вони легко підпадають під вплив корозії (при високих частотах розірваний провід може діяти як антена). Для заземлення треба використовувати провід діаметром 1,024 мм. Якщо провід доводиться часто від'єднувати, то необхідно застосовувати спеціальні клеми, які забезпечують швидке підключення. Зіркоподібні прокладки із зовнішніми зубцями, розміщені під клемми, сприяють утворенню суцільних контактів.

Резонансна частота перемичок чи дротів повинна принаймні в 16 разів перевищувати робочу частоту схеми, яку заземлюють.

Не можна використовувати контакти на саморізних гвинтах, гвинтовій різі, підшипниках, шарнірах, ковзаючих деталях. Такі контакти ненадійні, а струми заземлення можуть викликати корозію. При контакті шороховатих або неправильної форми поверхонь та стиків, які спричиняють високий опір для проходження сигналів високої частоти, доцільно використовувати провідні прокладки, які прикручують чи приклеюють до однієї з поверхонь (їх необхідно захищати від пошкоджень).

Провідний монтаж і кабелі забезпечують розводку кіл живлення, заземлення та передачу робочих сигналів між різними компонентами, конструктивними вузлами та системами. Наруги, струми та частоти робочих сигналів можуть коливатися у великих межах, тому електромонтаж повинен бути відповідним чином розрахований, здійснений та відлагоджений.

Перш за все необхідно класифікувати сигнали за напругою, струмом і частотою. Для зменшення перехресних завад у кабелі найслабший сигнал повинен мати напругу і струм, що дорівнюють за величиною не менше $\frac{1}{4}$ від напруги та струму найпотужнішого сигналу. Виходячи з цих міркувань провідний монтаж поділяють на шість видів:

- провідний монтаж електроживлення змінного струму, корпусної землі, низькочастотних звукових сигналів;
- провідний монтаж електроживлення постійного струму, постійної опорної напруги;
- провідний монтаж цифрових сигналів;
- провідний монтаж високочастотних сигналів, які створюють завади;
- провідний монтаж чутливих до наведень високочастотних сигналів;
- провідний монтаж антенних сигналів.

Чутливі електронні системи потребують «чистого» (без завад) мережевого електроживлення. Цій вимозі відповідають кола живлення під'єднані безпосередньо до розподільної панелі.

Дроти корпусної землі та сигналів низької частоти можуть бути включені в кабель електроживлення змінного струму. При цьому прямий і зворотний проводи змінного струму завжди необхідно скручувати.

Проводи сигналів низької частоти, чутливих до завад, можна об'єднати в жгут разом з проводами живлення постійного струму за умови, що у чутливих сигнальних ліній є окремі зворотні проводи. Зворотні проводи живлення постійного струму не можна використовувати як зворотні сигнальні проводи та для заземлення корпусу. Прямий та зворотний проводи живлення постійного струму необхідно скручувати.

Силові кабелі, що йдуть до схем з високим рівнем завад, повинні бути екрановані, причому екрани необхідно приєднувати до корпусу біля кінців кабелів і через кожні $0,2 \lambda$ по довжині.

Якщо є можливість, то для аналогових, цифрових, високочастотних і антенних сигналів необхідно використовувати окремі кабелі. Якщо ці проводи зібрані в одному кабелі, то необхідно кожен сигнал забезпечити зворотним проводом і використати додаткові заземлюючі проводи для ізоляції чутливих сигналів від сигналів, які створюють завади.

Лекція 18

Фактори оточуючого середовища та їх врахування при конструюванні БМА

18.1 Фактори оточуючого середовища та їх вплив на БМА [5]

18.1.1 Температура. Одним із проявів дії температури на РЕА є зміна лінійних розмірів елементів несучих конструкцій. Якщо під час конструювання не врахувати ці зміни, то при експлуатації можливі деформації зв'язків, заклинювання рухомих частин. Особливо небезпечні теплові удари - різкі перепади температури, від яких руйнуються в першу чергу крихкі матеріали (скло, кераміка) і деякі пластмаси з металевою арматурою. Особливо інтенсивно теплове руйнування відбувається в неоднорідних структурах.

Одночасно з механічними змінюються і фізичні властивості матеріалів. При збільшенні температури відбувається розм'якшення і витікання деяких заливочних сумішей, внаслідок чого можливе порушення герметичності конструкції, погіршення або втрата ізоляційних властивостей матеріалів. При температурах нижче 233 К деякі компаунди і ізоляційні матеріали стають крихкими і розтріскуються.

У результаті тривалого теплового впливу відбувається інтенсивне старіння матеріалів, яке супроводжується зміною механічних і електричних властивостей. При коливаннях температури змінюються параметри конденсаторів і контурних котушок, знижується опір ізоляції, змінюється добротність контурів та опір резисторів, що призводить до порушення роботи апаратури.

18.1.2 Вологість. Вплив вологи на параметри конструкції може проявлятися порівняно швидко (секунди, хвилини) або протягом тривалого часу (місяці, роки). Підвищення вологості швидко змінює діелектричну проникність повітря, що призводить до зміни ємності між елементами конструкції, ємності конденсаторів з повітряним діелектриком і може викликати пробій.

Повільніше (протягом кількох годин) проявляється дія вологи на поверхневий електричний опір ізоляційних матеріалів. Ще повільніше (місяці, роки) проявляється дія вологи у вигляді корозії металевих елементів конструкції, фізико-хімічних змін ізоляційних матеріалів, компаундів (набрякання, відшаровування стінок корпусу, хімічне руйнування).

Для металевих деталей РЕА характерні два види корозії - атмосферна і контактна (електрохімічна). Атмосферна корозія проходить під тонкою плівкою вологи на поверхні деталі у присутності кисню. Через незначну кількість вологи концентрація іонів в розчині виявляється значною, змивання продуктів корозії не відбувається, вони залишаються на місці руйнування, зчеплюючись з поверхнею. Тому хімічна стійкість металевих деталей багато в чому визначається захисними властивостями продуктів корозії.

Так, на деталях з алюмінієвих і магнієвих сплавів виникає оксидна плівка, яка суттєво сповільнює хімічну корозію, а на маловуглецевій сталі оксидна плівка утворюється повільніше, є пористою та гігроскопічною і підсилює корозію.

Електрохімічний (контактний) механізм корозії спостерігається в місці дотику двох різних металів під плівкою вологи, що містить залишки солей (електроліт). Інтенсивність процесу залежить від взаємного розміщення контактуючих металів у витісняючому ряді (ряді напруг). Ряд побудовано по спадаючій активності, тобто кожен наступний метал при контакті менш активно віддає іони в електроліт, ніж попередній, а отже, повільніше розчиняється при електролізі, наприклад:

магній	-2,370	нікель	-0,250
алюміній	-1,160	олово	-0,136
цинк	-0,760	мідь	+0,337
хром	-0,740	срібло	+0,800
залізо	-0,430	золото	+1,500
кадмій	-0,400		

Розміщення в ряді може змінюватися в залежності від умов експлуатації. Однією з причин такого переміщення є схильність деяких металів утворювати поверхневі плівки (особливо в оксидних середовищах). При цьому, як правило, зсув відбувається в бік позитивних потенціалів.

18.1.3 Атмосферний тиск. Експлуатація РЕА при пониженому атмосферному тиску характерна для апаратури, що працює в умовах високогір'я, поза герметичними відсіками у літальних апаратах. Основною особливістю експлуатації в цих умовах є зниження електричної міцності повітряних прошарків.

Висота над рівнем моря, тис. м	1	3	5	10	20	30
Відносна електрична міцність	1,0	0,80	0,62	0,35	0,10	0,03

Наявність гострих кутів у деталей конструкцій, що перебувають під високою напругою, створює сприятливі умови для виникнення коронного розряду (коронування). Герметизована РЕА, розміщена поза гермовідсіком відчуває дію внутрішніх розривних зусиль.

18.1.4 Біологічні фактори. До специфічних факторів, що впливають на РЕА, яка експлуатується в умовах вологого клімату, належать пліснява та комахи. Грибок плісняви інтенсивно розвивається при високій вологості (не нижче 65%), практично при будь-якій температурі оточуючого середовища. Росту грибка сприяє застій повітря. Грибки плісняви не містять хлорофілу і тому використовують органічні речовини, на яких відбувається їх ріст (іноді

вистачає забруднення поверхні деталі від спітнілих рук і пилу). Міцелій грибка складається з води з високим вмістом білка і поживних солей. По ньому може відбуватися коротке замикання електричного кола, крім того, органічні кислоти, що входять у такий електроліт, прискорюють корозію струмонесучих ділянок.

Несправності РЕА часто виникають через проникнення всередину комах. Їх трупі при високій вологості сприяють корозії і утворюють сприятливе середовище для розвитку плісняви.

18.1.5 Пил. Пил спричиняє великий вплив на наземну РЕА. При відносній вологості 75% більша частина атмосферного пилу просочена вологою. Вже при 70% відносної вологості відбувається коагуляція (злипання) частинок. При нижчій вологості частинки набувають електричного заряду.

До складу пилу входять як неорганічні, так і органічні частинки текстильного і рослинного походження. Неорганічний пил складається з попелу, винесеного вітром з тягою, вуличного пилу (з діаметром частинок 100 мкм), дрібних часточок сажі, розмір яких складає долі мікрметра, продуктів згоряння сірки, що входять до складу димових газів у промислових районах.

Вплив пилу на РЕА виявляється у вигляді засмічення мастила механізмів, прискорюючи зношення та викликаючи заїдання. Найбільш небезпечними є пилові зерна розміром від 1 до 40 мкм. Гігроскопічні властивості деяких частинок пилу сприяють виникненню пробою діелектриків або корозії. У тропічних умовах осадження пилу є однією з причин росту плісняви.

18.2 Захист елементів конструкції радіоелектронних апаратів від впливів зовнішнього середовища

18.2.1 Захист металевих поверхонь від корозії здійснюється шляхом нанесення антикорозійних покриттів: металевих, неметалевих (хімічних), плівкових (лакофарбових, емалевих).

Металеві покриття можуть бути електролітичні (гальванічні), гарячі, дифузійні та ін., залежно від способу нанесення.

Гальванічні покриття отримують шляхом виділення металів із розчинів їх солей під дією електричного струму. Деталь, яку покривають, є катодом, а анодом – допоміжний електрод, як правило, з того ж матеріалу, що і покриття.

Хімічні покриття – це плівки певного хімічного складу, які утворюються на металі в результаті впливу на нього хімічних реагентів. Найбільш поширені оксидні і фосфатні плівки. Хімічні покриття, зокрема оксидні, застосовують як самостійно, так і для підсилення захисних властивостей гальванічних покриттів.

Плівкові покриття утворюють на поверхні деталі тонкий суцільний шар лаку. Основне їх призначення - захист деталі від впливу вологи. При

просочуванні чи покритті використовують ізоляційні лаки СБ1-С, УР-231, емалі ЕП-51, ГФ -92-ХС і компаунди МБК, ЭЗК, ФК-20, УТ-31 та ін.

Для захисту поверхонь складних нероз'ємних вузлів і деталей великих габаритів використовують фарбування з попередньою ґрунтовкою і шпаклівкою. Фарбування здійснюється в кілька шарів. Для фарбування використовують переважно емалі, наприклад, ПФ-115, МЛ-12 і т. д.

18.2.2 Герметизація - це забезпечення практичної непроникності корпусу радіоелектронної апаратури для рідин та газів з метою захисту її елементів і компонентів від вологи, плісняви, пилу, піску, бруду, механічних пошкоджень.

Застосовують індивідуальну, загальну, часткову та повну герметизацію. Індивідуальна герметизація допускає заміну компонентів РЕА при виході їх з ладу і ремонт виробу.

При загальній герметизації заміна компонентів і ремонт можливі лише за умови демонтажу герметичного корпусу, що може викликати певні труднощі. Незважаючи на це, загальна герметизація простіша і дешевша, ніж індивідуальна.

Для часткової герметизації застосовують просочення, обволікування та заливку як компонентів, так і виробів в цілому лаками, пластмасами і компаундами на органічній (фторорганічній) основі. Як правило, ці процеси не забезпечують герметичності на тривалій час.

Практично повний захист РЕА від проникання води, водяної пари, газів та пилу досягається при її розміщенні в герметичних корпусах - роз'ємних або нероз'ємних. Герметичність роз'ємних корпусів досягається ущільненням стиків корпусу за допомогою еластичних (гумових) або металевих прокладок. Для під'єднання зовнішніх електричних кіл використовують керамічні або скляні ізолятори, герметизовані штепсельні роз'єми, вулканізовані кабельні вводи.

Недоліком скляних ізоляторів є чутливість до теплових ударів. Більш надійні в цьому відношенні - склокерамічні і керамічні ізолятори.

Пристрої керування герметизують гумовими чохлами, шайбами, фетровими або фторопластовими сальниками. Для передачі руху всередину герметичного корпусу користуються постійними магнітами і електромагнітами.

Недоліки роз'ємного герметичного корпусу - підвищені вимоги до міцності, складність виконання і контролю надійності роз'ємного герметичного з'єднання. Перевага - відносно легкий доступ до компонентів РЕА.

При розміщенні РЕА у нероз'ємному (паяному чи зварному) корпусі суттєво ускладнюється доступ до компонентів при спрощенні конструкції гермокорпусу.

Просочення - процес заповнення ізоляційним плівкоутворюючим матеріалом пор і невеликих шпарин у компонентах РЕА з метою підвищення їх електричної і механічної міцності, захисту від ушкоджень, волого-, тепло- та

хімічної стійкості. Просочують моторні вироби, деталі з волокнистих і пористих матеріалів (каркаси котушок, монтажні колодки, плати та ін.)

Просочення та просушування виконуються при нормальному або підвищеному атмосферному тиску або під вакуумом. Для просочення використовуються лаки БТ-987, ГФ-95, МЛ-92 та ін., придатні для використання в діапазоні температур 213-473 К, які забезпечують опір ізоляції $10^8 - 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

У просочених виробах не можна застосовувати просочені лаком ізоляційні матеріали: лакотканину, бавовняні і хлорвінілові трубки, фібру. У багатошарових обмотках (з числом шарів >4) застосовується спеціальний папір (міколентний), склотканина та інші матеріали, що легко просочуються. Осердя з фериту та пермалою потрібно захищати від впливу механічних напруг, які виникають при полімеризації лаку і зменшують проникність осердя, за допомогою прокладок із термостійкої гуми, спеціальних контейнерів, компаундів на основі кремнієорганічного каучуку типу "Віксінт У-1-18".

Обволікування - процес утворення покривних оболонок на поверхні виробів, призначених для короткочасної роботи в умовах впливу вологи. Обволікуванню може передувати просочування.

Заливка - процес заповнення ізоляційним матеріалом вільного простору між вузлом і стінкою захисного корпусу (безкорпусні вироби заливають у спеціальних формах). Заливка вузлів РЕА, окрім захисту від метеорологічних факторів дозволяє отримувати вироби з точними геометричними розмірами і високою чистотою обробки поверхні, підвищує механічну міцність. За рівнем забезпечення вологостійкості обволікування поступається заливці. Слабким місцем виробу після заливки є виводи, вздовж яких утворюються капілярні канали на межі дотику матеріалів з різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення.

Матеріалами для обволікування та заливки служать епоксидні компаунди ЕЗК-1; 4; 5;...; 12; 165, ЕПК-1; 4, ЕК-20; компаунди підвищеної еластичності ЕЗКПЕ-1; 4; 5; 6; з наповнювачами ЕКПН-1; 4; 5; 7.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яворський Б.І. Фізико-теоретичні основи конструювання РЕА. Конспект лекцій. – Тернопіль: ТДТУ ім. Івана Пулюя, 1998.
2. Белинский В.Т., Гондюл В.П., Грозин А.Б. и др. Практическое пособие по учебному конструированию РЭА. – К.:Вища школа, 1992. – 494 с.
3. Машинный расчет интегральных схем. – М.: Мир, 1971.
4. Роцин Г.И. Конструирование механизмов радиоэлектронной аппаратуры. Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1973.
5. Фрумкин Г.Д. Расчет и конструирование радиоаппаратуры: Учебник для радиотехнических специальных техникумов. –М.:Высш. школа, 1989.– 463с.
6. Спокотный Ю.Е., Сибиряков В.В. Тепломассообмен в РЭА. – К: Одесса, Высшая школа, 1988.
7. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. –2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1981.
8. Гелль П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микро-миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. –Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние. 1984. – 536 с., ил.
9. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами: Пер. с англ. –М.:Мир, 1990. –238 с., ил.