

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет автоматики, телемеханіки та зв'язку

Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового проекту
з дисципліни

«ОСНОВИ САПР» та «САПР ПРИСТРОЇВ І СИСТЕМ АВТОМАТИКИ»

Харків 2015

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем 26 лютого 2015 р., протокол № 9.

Описано методику проектування друкованої плати засобами PCAD-подібних систем автоматизованого проектування KiCAD, EAGLE Layout Editor, що вільно поширюються.

Методичні вказівки призначені для студентів напрямів «Комп'ютерна інженерія» та «Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціальностей «Автоматика та автоматизація на транспорті» та «Спеціалізовані комп'ютерні системи», які вивчають курси «САПР пристроїв і систем автоматики» та «Основи САПР», денної, заочної форм навчання та інституту перепідготовки кадрів.

Укладач

проф. М.А. Мірошник

Рецензент

проф. С.В. Лістровий

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Вихідні дані й обмеження процесу проектування.....	6
1.1 Конструкторський аналіз технічного завдання і схеми електричної принципової.....	6
1.2 Аналіз аналога.....	8
1.3 Вибір методу проектування.....	8
2 Проектування модулів і міжелементних з'єднань.....	11
2.1 Проектування друкованих плат.....	11
2.2 Базисні матеріали для виробництва друкованих плат.....	18
2.3 Розрахунок елементів основного рисунка.....	22
2.4 Оцінка віброміцності конструкції ЕА (електронної апаратури).....	27
3 Теплофізичне проектування ЕА.....	35
3.1 Загальні положення.....	35
3.2 Розрахунок теплового режиму ЕА при природному повітряному охолодженні.....	39
3.3 Порядок розрахунку теплового режиму блока в герметичному корпусі.....	46
3.4 Порядок розрахунку теплового режиму блока з внутрішнім перемішуванням.....	50
3.5 Порядок розрахунку теплового режиму блока в перфорованому корпусі.....	52
4 Проектування деталей і вузлів несучої конструкції й електричного монтажу.....	45
4.1 Особливості розроблення елементів несучої конструкції	56
4.2 Жорсткість елементів конструкції.....	57
4.3 Конструкція електричного монтажу.....	62
4.4 Основні види перешкод і способи їхнього усунення.....	64
5 Міцнісний і вібраційний розрахунок електронних пристроїв..	69
Список літератури.....	75

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку суспільства одним із пріоритетних завдань є подальший розвиток методів автоматизованого проектування на базі нових інформаційних технологій.

У центрі уваги вищої школи постійно перебувають питання підготовки фахівців у галузі систем автоматизованого проектування. Особливою проблемою є аналіз ефективності застосування тих чи інших інформаційних технологій у навчальному процесі.

Використання промислових САПР у навчальному процесі дозволяє працювати з технічними засобами САПР, використовувати САПР у практичній роботі, навчати прийомам експлуатації системи і методам автоматизованого проектування, у якому той, хто навчається, бере активну участь.

Промислові САПР дозволяють проводити процес навчання так, щоб воно було ефективним як у плані засвоєння, так і в плані розвитку і закріплення у студентів творчих навичок у вирішенні завдань проектування електронно-обчислювальних засобів. Методика проведення лабораторного практикуму, викладена в методичних вказівках, охоплює весь цикл проектування друкованих плат.

Впровадження в інженерну практику методів автоматизації проектувальних робіт дозволяє перейти від традиційного макетування розроблюваних електронних пристроїв до їхнього моделювання за допомогою персонального комп'ютера і реалізувати цикл наскрізного проектування, що передбачає:

- синтез структури і принципової схеми пристрою;
- аналіз характеристик пристрою в різних режимах роботи з урахуванням розкиду параметрів компонентів і наявності дестабілізуючих факторів;
- синтез топології, включаючи розміщення ЕЛЕМЕНТІВ на комутаційному полі і трасування міжз'єднань;
- верифікацію топології;
- проектування конструкції виробів;
- випуск конструкторської документації.

Задачі структурного синтезу розв'язуються за допомогою вузькоспеціалізованих програм, орієнтованих на пристрої певного типу.

Процес синтезу принципової схеми в наш час ще недостатньо автоматизований, тому що він являє собою складану, високоінтелектуальну діяльність, у якій цілком замінити людину поки що неможливо. Як правило, початковий варіант схеми створюється інженером "вручну" з наступним моделюванням і оптимізацією за допомогою ЕОМ. Засоби САПР дозволяють створити графічне зображення схеми, що використовується при подальшому проектуванні друкованого модуля.

Задачі автоматизації конструкторсько-технологічного проектування електронних апаратів успішно розв'язуються за допомогою спеціалізованих систем вітчизняного та іноземного виробництва. Загальна структура САПР конструкторсько-технологічного призначення передбачає наявність інтегрованих бібліотек компонентів, засобів формування графічних зображень електричних схем і друкованих модулів, підсистем автоматизації проектних операцій, інженерних розрахунків і технологічної підготовки виробництв. Моделювання – це дослідження проектного об'єкта в середовищі, де передбачається його функціонування.

На сьогоднішній день основною проблемою при проектуванні друкованих плат є їх підвищена складність і різке скорочення термінів проектування при постійно зростаючій вимозі щодо їхньої якості. Поява мікросхем у корпусах з малим кроком, з кульковими виводами (BGA), зростання вимог до швидкодії схем та електромагнітної сумісності, вдосконалення технології виробництва та виготовлення друкованих плат на імпортному обладнанні призводить до використання САПР P-CAD, що має цілий ряд принципово нових можливостей.

За оцінкою фахівців, у наш час у промисловості України найбільш популярною серед систем автоматизованого проектування є система P-CAD, що функціонує на персональних комп'ютерах класу IBM PC. Однак відчувається певний дефіцит інформації з методики роботи проектувальника з цією системою.

Сучасні системи керування являють собою складний комплекс електромеханічних і електронних пристроїв. Створення

систем керування, до складу яких входять обчислювальні машини, призвело до збільшення кількості радіоелектронної апаратури (ЕА). Структура системи керування залежить від властивостей об'єкта керування і від його призначення.

У процесі експлуатації електронна апаратура піддається впливу різних факторів, що негативно впливають на її надійність. До них належать нагрів й охолодження; зміна тиску, вологості, хімічного і біологічного складу навколишнього середовища; потрапляння пилу і піску, що знаходяться в земній атмосфері; сонячна і штучна радіація; вібрація й удари. Для підвищення надійності ЕА необхідно при її конструюванні враховувати вплив цих факторів.

1 ВИХІДНІ ДАНІ Й ОБМЕЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОЕКТУВАННЯ

1.1 Конструкторський аналіз технічного завдання і схеми електричної принципової

Аналізу схеми електричної принципової (у конструкторській документації ЕЗ) передуює аналіз технічного завдання (ТЗ), при якому уточнюють вихідні дані на проектування.

Аналіз змісту вихідних даних може розглядатися з погляду їхньої повноти або принципової наявності інформації про майбутню конструкцію. Тут необхідно зіставити наявні дані і зміст загальних технічних вимог до даного класу конструкцій.

Порівняння умов експлуатації виробу і технічних умов використання елементної бази починається з конкретизації технічних умов і обмежень на проектування електронної апаратури (далі – ЕА) з заданими елементами за довідковою літературою. На цьому етапі аналізу необхідно вказати можливі конструктивні рішення щодо захисту від кліматичних і механічних зовнішніх впливів.

Якщо технічними вимогами на проєктований виріб задано температурний інтервал роботи пристрою від -50 до $+60$ °С, то необхідно використовувати елементи, що за своїми технічними

умовами здатні задовільно працювати в більш широкому температурному інтервалі. Елементи, що за своїми технічними умовами можуть задовільно працювати в діапазоні температур від -40 до $+70$ °C чи від -60 до $+50$ °C, без додаткових заходів використовувати не можна. Більш того, неправильним буде також використання елемента, що може експлуатуватися в тому самому діапазоні температур ($-50 \dots +60$ °C).

Аналіз органів керування, індикації і приєднання схеми дозволяє уточнити вимоги до конструкції ЕА відповідно до основного призначення виробу.

Для ЕА можна виділити такі конструктивні елементи: органи керування – клавіші і кнопки; органи індикації – світлодіоди чи інші елементи, зазначені на схемі; органи приєднання (залежать від конкретного застосування).

При аналізі органів керування й індикації варто вивчити можливість застосування перспективних новітніх елементів керування і відображення.

До елементів приєднання в першу чергу відносять високочастотні й електричні з'єднувачі. Якщо у ТЗ тип з'єднувача не зазначено, то вибирають його з урахуванням призначення, кількості контактів, вимог механічної і кліматичної стійкості, захисту від інших зовнішніх впливів, електричних параметрів і вартості.

Схему електричну принципову необхідно оцінити з погляду можливостей конструкторського виконання чи її компонування з заданими обмеженнями.

Маючи установчі розміри елементів, обмеження на розміри плати і користуючись рекомендаціями [1], можна оцінити виконанність конструктивних вимог ТЗ для другого конструктивного рівня. Для третього конструктивного рівня (блока) необхідно уточнити форму розроблюваного виробу. Форма виробу, насамперед, повинна бути технічно раціональною й економічно виправданою, тобто задовольняти вимоги технічної естетики й інженерної психології.

Уточнення форми розроблюваного виробу можна проводити в такій послідовності:

1) визначення елементів схеми, установлюваних на лицьовій панелі чи стінках виробу;

2) вибір виду форми (можливий об'ємний, плоский і лінійний вид форми [2]);

3) визначення положення виробу в просторі при оптимальному співвідношенні габаритних розмірів виробу і розмірів людини, тобто оптимальному відповідно до вимог ергономіки [2, 3];

4) вибір фактури поверхні виробу (гладка, шорсткувата і т. д.) і кольорів.

За необхідності (за узгодженням з керівником) оцінюються маса і компоувальні параметри виробу.

1.2 Аналіз аналога

Одним з основних завдань аналізу аналогічного виробу є виділення тих засобів захисту від зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів, які можна використовувати в розроблюваному виробі. При цьому необхідно звернути увагу на такі конструктивні рішення:

- орієнтація плат і блоків стосовно конвективного холодного потоку;

- групове кріплення плат у блоці;

- оптимальна відстань установлення плат з урахуванням об'ємів друко-ваних вузлів і блока;

- покриття плат лаком для підвищення міцності і захисту від впливу вологи;

- електричні міжплатні і міжблочні з'єднання;

- геометричний вигляд і положення в просторі;

- способи установлення і закріплення виробу на об'єкті;

- оригінальність художньо-конструктивного рішення.

Аналіз конструкції аналога дозволяє виробити додаткові експлуатаційні вимоги ТЗ щодо розроблюваного виробу.

1.3 Вибір методу проектування

Зараз при конструюванні використовуються такі методи [4]:

- геометричний – для виробів, що виготовляються в масовому виробництві і які побудовані на взаємозамінних деталях;

- машинобудівний – при проектуванні несучих конструкцій ЕА всіх рівнів, а також усіх видів нерухомих з'єднань (дає можливість забезпечити механічну міцність при мінімальній масі);

- топологічний – при представленні конструктивного виду електричної схеми і її топологічних зв'язків (незалежно від її функціонального змісту) для створення друкованого рисунка.

За способом структури зв'язків ЕА розрізняють такі методи проектування конструкцій: базовий, евристичний і автоматизований. Ці методи містять у собі перераховані вище методи проектування і відображають специфіку проектування ЕА.

Вибір методу проектування визначається розв'язуваними задачами, вихідною інформацією і наявними засобами проектування. Проектування електричного кола друкованої плати, блока, приладу неможливо без топологічного методу. При цьому схему зв'язків зображують графом, вершини якого відповідають вузлам зв'язку чи елементам схеми, а ребра, що зв'язують вершини між собою, - лініям зв'язку чи провідникам. Цей метод успішно використовують при машинному розподілі схеми на модулі, розміщенні елементів на платі, трасуванні з'єднань і розробленні топологічних структур.

На етапі технічного проектування (ТП) метод топологічного проектування забезпечує скорочення кількості провідників, їхньої довжини, кількості паяних з'єднань, виводів на з'єднувачі, мінімальної кількості шарів, раціонального розподілу схеми на друковані плати і т. д. У той же час він дозволяє врахувати задані конструктивні і технологічні обмеження.

При розробленні конструкції з використанням стандартних і уніфікованих конструкцій здебільшого застосовують геометричний метод. Для вібронапруженої апаратури при розрахунках несучих конструкцій частіше використовують машинобудівний метод.

Визначальним у методах проектування ЕА є базовий чи модульний підхід. В основу підходу покладено розподіл апаратури на конструктивно і схемно закінчені частини. Причому як базовий підхід, так і його різновиди (функціонально-вузловий, функціонально-модульний і функціонально-блоковий) засновані на принципах агрегування, функціональної і розмірної взаємозамінності, схемної і конструкторської уніфікації. Різновиди базового підходу проектування пов'язані з різним ступенем уніфікації (функціональних вузлів, модулів, блоків).

У знову розроблюваних виробках ЕА широке застосування знаходить евристичний підхід, у якому використовується узагальнений практичний досвід у галузі проектування ЕА. На етапі ескізного проектування (ЕП) він застосовується для пошуку нових технічних рішень. Ефективність застосування методу проектування, різних підходів і методик залежить від ступеня використання ЕОМ.

При автоматизації проектування найчастіше вирішуються завдання компонування елементів схеми, трасування електричних з'єднань між елементами, креслення креслень і випуску конструкторської документації (КД).

За ДСТ 23751-86 проектування такого основного елемента конструкції ЕА, як друкованої плати, може бути здійснено такими способами: ручним, напівавтоматизованим, автоматизованим.

Ручний спосіб проектування передбачає, що розподіл навісних елементів на функціональні групи, розміщення груп елементів на поверхні плати, трасування друкованих провідників (спочатку на одному кресленні, потім перерозподіл по провідних шарах плати) виконуються конструктором. Ручний спосіб проектування забезпечує оптимальний розподіл основного рисунка і скорочення кількості вузьких місць.

Напівавтоматизований спосіб проектування виконує розміщення навісних елементів за допомогою ЕОМ при ручному трасуванні друкованих провідників чи ручний розподіл навісних елементів при автоматизованому трасуванні провідників. Цей спосіб забезпечує прискорення процесу проектування при оптимальному розміщенні провідного рисунка.

Автоматизований спосіб проектування передбачає кодування вихідних даних, розміщення навісних елементів і трасування друкованих провідників за допомогою ЕОМ. Допускається доопрацювання окремих з'єднань вручну. Цей спосіб забезпечує високу продуктивність праці при виготовленні креслень.

2 ПРОЕКТУВАННЯ МОДУЛІВ І МІЖЕЛЕМЕНТНИХ З'ЄДНАНЬ

2.1 Проектування друкованих плат

Проектування конструкції друкованої плати має такі основні етапи:

- вивчення технічного завдання на виріб (друкований вузол, блок), до складу якого входить плата, що проектується;
- вибір і обґрунтування типу друкованої плати;
- вибір і обґрунтування класу точності;
- вибір габаритних розмірів і конфігурації друкованої плати;
- вибір матеріалу основи друкованої плати;
- розміщення навісних елементів на друкованій платі;
- трасування провідників, розміщення елементів основного рисунка на друкованій платі, перевірочні розрахунки;
- розроблення конструкторської документації (складальне креслення, деталювання, шари друкованої плати, перелік елементів і т. д.).

На підставі вимог ТЗ на виріб, до складу якого входить проєктована плата, визначають умови експлуатації. Залежно від умов експлуатації визначають групу жорсткості за ОСТ 4.077.000, що обумовлює відповідні вимоги до конструкції плати, до використовуваного матеріалу основи, до основного рисунка і необхідності застосування додаткового захисту від кліматичних, механічних та інших впливів. Розглянемо основні етапи конструювання друкованої плати.

1 Аналіз технічного завдання на виріб (друкований вузол, блок) виконується відповідно до вказівок розділу 1.

2 Вибір або обґрунтування типу друкованої плати.

За конструкцією друковані плати з жорсткими і гнучкими основами поділяються на односторонні (ОПП), двосторонні (ДПП) і багатошарові (БДП) друковані плати. При виборі типу друкованої плати для розроблюваної конструкції друкованого вузла варто враховувати, що трудомісткість виготовлення друкованої плати зростає зі збільшенням кількості шарів і підвищенням класу точності.

3 Вибір або обґрунтування класу точності.

За точністю виконання елементів основного рисунка друковані плати відповідно до ДСТ 23751-86 поділяються на п'ять класів точності, які зазначені в таблиці 2.1.

Друковані плати першого і другого класів точності найбільш прості у виконанні, надійні в експлуатації і мають мінімальну вартість. Друковані плати третього, четвертого і п'ятого класів точності вимагають використання високоякісних матеріалів, інструмента й устаткування, обмеження габаритних розмірів, а в окремих випадках і особливих умов при виготовленні.

Таблиця 2.1 – Номінальні значення розмірів основних параметрів елементів конструкції друкованої плати для вузького місця, мм

Умовне позначення	Клас точності				
	1	2	3	4	5
t	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
s	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
b _н	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025
b _в	0,15	0,10	0,05	0,03	0,015
δ	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20

Примітки: t – ширина друкованого провідника; s – відстань між сусідніми елементами основного рисунка; b_н – гарантійний пасок зовнішнього шару; b_в – гарантійний пасок внутрішнього шару; δ – відношення діаметра металізованого отвору до товщини плати

4 Вибір габаритних розмірів і конфігурації друкованої плати.

Габаритні розміри друкованих плат повинні відповідати ДСТ 10317-79 при максимальному співвідношенні сторін 3:1. Рекомендується розробляти друковані плати простої прямокутної

форми. Конфігурацію, що відрізняється від прямокутної, варто застосовувати тільки в технічно обґрунтованих випадках. При виборі габаритних розмірів друкованих плат потрібно керуватися лінійними розмірами, установленними ДСТ 10317-79 та наведеними в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Переважні лінійні розміри друкованих плат, мм

Довжина		Ширина		Квадратність лінійного розміру
мінімальн а	максимальн а	мінімальн а	максимальн а	
10	100	10	100	2,5
105	350	35	350	5,0
355	470	130	470	10,0

Максимальні розміри друкованої плати для кожного класу точності повинні бути не більше значень, наведених у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Максимальні розміри друкованих плат, мм

Вид плати	Клас точності				
	1	2	3	4	5
Одностороння	470x470	470x470	400x400	240x240	180x180
Двостороння	470x470	470x470	400x400	180x180	180x180
Багатошарова	470x470	470x470	240x240	180x180	180x180

Розміри контуру друкованої плати, що поєднуються, повинні мати граничні відхилення по 12-му квалітету, а тих, що не поєднуються, – по 14-му квалітету відповідно до ДСТ 25347-82 (СТ СЕВ 145-75).

Товщина друкованої плати визначається товщиною вихідного матеріалу і вибирається залежно від використовуваної елементної бази і діючих механічних навантажень. Кращими товщинами одно- і двосторонніх друкованих плат є 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм. Допуск на товщину друкованої плати

встановлюють на підставі відповідних стандартів чи технічних умов на вихідний матеріал (ДСТ 23751-86). Допуск на сумарну товщину друкованої плати в зоні кінцевих контактів встановлюють залежно від вимог на з'єднувач.

5 Вибір матеріалу основи друкованої плати.

Матеріал для друкованої плати вибирають за ДСТ 10316-78, ДСТ 23751-86 чи технічними умовами. Матеріали, що рекомендуються для виготовлення друкованих плат, наведені в п. 2.2.

Для друкованих плат, призначених для експлуатації в умовах першої і другої груп жорсткості за ОСТ 4.077.000, рекомендується застосовувати матеріали на основі паперу, для третьої і четвертої груп жорсткості – на основі склотканини.

6 Розміщення навісних елементів на друкованій платі.

Розміщення навісних елементів на друкованій платі здійснюється відповідно до ОСТ 4.010.030 і ОСТ 4.ГО.010.009. Розміщення навісних елементів при конструюванні друкованих плат під автоматичне установлення елементів роблять відповідно до ОСТ 4.091.124-79. Розміщення навісних елементів на платі варто погодити з конструктивними вимогами на друкований вузол, блок і пристрій у цілому. При розташуванні навісних елементів необхідно передбачати таке: забезпечення основних технічних вимог, що висуваються до апаратури (автоматизоване складання, паяння, контроль); забезпечення високої надійності, малих габаритних розмірів і маси, тепловідвод, ремонтпридатність.

Вибір варіантів установлення елементів на плату роблять відповідно до заданих умов експлуатації й інших технічних вимог до конструкції друкованого вузла й апаратури.

Розміщують навісні елементи в такий спосіб: принципова електрична схема розподіляється на функціонально зв'язані групи, потім розміщують навісні елементи в кожній групі. Група елементів, що має найбільшу кількість зовнішніх зв'язків, розміщується поблизу з'єднувача. Група елементів, що має найбільшу кількість зв'язків із уже розміщеною групою навісних елементів, розміщується поруч і т. д. За необхідності робиться

коректування в розміщенні окремих навісних елементів чи за узгодженням з керівником проекту заміна адрес зв'язків. За ДСТ 23751-86 необхідно виконувати раціональне розміщення навісних елементів з урахуванням електричних зв'язків і теплового режиму з забезпеченням мінімальних значень довжин зв'язків, кількості переходів друкованих провідників із шару на шар, паразитних зв'язків між навісними елементами. Крім того, якщо можливо, доцільно виконати рівномірний розподіл мас навісних елементів по поверхні плати з установленням елементів з більшою масою поблизу місць механічного кріплення плати. За необхідності рекомендується встановлювати навісні елементи на тепловідвідні металеві шини чи радіатори [3] (ОСТ 4.ГО.010.009).

7 Трасування провідників і розміщення елементів основного рисунка на друкованій платі.

Для виконання трасування необхідно викреслювати ескіз друкованої плати в масштабі 2:1 на прозорій плівці чи кальці, нанести на нього з двох сторін координатну сітку і позначити посадкові місця. Координатну сітку і початок координат розташовують відповідно до ДСТ 2.417-78. Для плат одного розміру розташування координатної сітки повинне бути однаковим.

Сторони прямокутної друкованої плати розташовують паралельно лініям координатної сітки. Крок координатної сітки вибирати на підставі таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Крок координатної сітки

Клас точності	1	2	3	4
Крок координатної сітки, мм	2,50	2,50	1,25 2,50	1,25 2,50
	(1,25)	(1,25)	(0,625) (0,50)	(0,625) (0,50)
Примітка – у дужках дано непереважні значення				

Якість трасування значно підвищується, якщо перед трасуванням за результатами розміщення було виконано побудову ортогональних мінімальних дерев і отримано таблицю з'єднань. Користуючись цією таблицею, спочатку виконують трасування кіл простої конфігурації, реалізованих без переходу з

одного шару в інший, а потім проводять кола складної конфігурації. Перехід кола з одного шару в інший і назад здійснюється за допомогою наскрізних металізованих отворів. При трасуванні рекомендується виконувати всі горизонтально розташовані фрагменти на одній стороні плати, а вертикально розташовані – на іншій. Цей прийом дозволяє одержувати коло мінімальної довжини, але погіршує технологічні і якісні характеристики ДП через велику кількість перехідних отворів.

Отвори й елементи основного рисунка розташовують на друкованій платі відносно бази координат. При розміщенні на друкованій платі декількох рисунків використовують тільки одну базу координат. Базу вибирають таким чином, щоб виключити наявність мінусових значень координат в отворів, використовуваних на друкованій платі.

Елементи основного рисунка розташовують від краю плати, неметалізованого отвору (діаметром більше 1,5 мм), паза, вирізу і т. д. на відстані не менше товщини плати з урахуванням допуску на лінійні розміри. Для плат товщиною менше 1 мм їх розташовують на відстані не менше 1 мм, якщо це не суперечить електричній міцності.

Діаметри монтажних і перехідних металізованих і неметалізованих отворів повинні відповідати ДСТ 10317-79. Під перехідним отвором друкованої плати розуміється отвір, що служить для з'єднання основних шарів друкованої плати.

Переважні розміри монтажних отворів (ДСТ 23751-86) вибирають з 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 мм, а перехідних отворів - з ряду 0,7; 0,9; 1,1 мм. Не рекомендується використовувати більше трьох різних діаметрів монтажних отворів. Діаметри монтажних отворів вибирають так, щоб різниця між мінімальним значенням діаметра отвору і максимальним значенням діаметра виводу встановлюваного елемента була в межах 0,1...0,4 мм. Центри монтажних і перехідних отворів на друкованій платі розташовують відповідно до ДСТ 10317-79.

Центри монтажних отворів під неформовані виводи багатовивідних елементів, міжцентрові відстані яких не кратні

кроку координатної сітки, варто розміщувати таким чином, щоб у вузлі координатної сітки знаходився центр принаймні одного з монтажних отворів (для першого виводу). Центри монтажних отворів під інші виводи розташовуються відповідно до вимог конструкції встановлюваного елемента.

Взаємне розташування монтажних отворів під виводи навісних елементів має відповідати ОСТ 4.010.030; ОСТ 4.091.124-79; ОСТ 4.070.010-78.

Розміри і конфігурацію кріпильних та інших конструктивних отворів, наприклад для корпусу навісних елементів, вибирають за ДСТ 11284-75 залежно від вимог до конструкції встановлюваного елемента. Всі отвори на друкованій платі виконують без зенкувань. Допускається в металізованих отворах друкованих плат притуплення гострих крайок, що при розрахунку діаметра контактної площадки не враховують.

Отвори, що піддаються металізації (перехідні і монтажні), мають діаметр не менше однієї третини товщини плати, якщо остання не менше 0,1 мм [5]. Металізовані отвори повинні мати контактні площадки з двох сторін друкованої плати. На внутрішніх шарах багатошарової друкованої плати контактні площадки повинні бути в тих отворах, що зв'язані електрично з основним рисунком даного шару.

Неметалізовані монтажні отвори варто розташовувати в зоні контактної площадки.

Контактні площадки можуть мати довільну форму (кращою є кругла форма). Контактна площадка, призначена під установлення першого виводу багатовивідного елемента, повинна мати форму, відмінну від інших. Контактну площадку неметалізованого отвору варто збільшувати у вільну сторону з таким розрахунком, щоб її площа (без урахування площі отвору) для першого і другого класів була не менше 2,5 мм², для інших класів – не менше 1,6 мм².

Контактні площадки для контролю варто виконувати круглої форми діаметром не менше 2 мм і розташовувати у вузлах координатної сітки з кроком 2,5 мм у вільних місцях у шаховому порядку так, щоб відстань між центрами площадок, що лежать

на одній лінії, була кратна 5, а відстань між центрами контактних площадок, що лежать на сусідніх лініях координатної сітки, кратна 2,5 мм.

Числові значення діаметрів контактних площадок для ряду отворів, що рекомендується, дано в ОСТ 4.010.019-81. Ширину провідників і відстань між елементами основного рисунка визначають залежно від електричних, конструктивних і технологічних вимог. Номінальні значення основних параметрів рисунка друкованої плати у вузькому місці для кожного класу точності наведені в таблиці 2.1. Для вільного місця значення цих параметрів допускається встановлювати по кожному більш низькому класу, а для першого класу – збільшувати у два рази.

Друковані провідники рекомендується виконувати однакової ширини (за нормами для вільного місця на всій їхній довжині). Звужувати провідники до мінімального значення слід тільки у вузькому місці на можливо меншій довжині. Провідники шириною більше 3 мм, розташовані на друкованій платі з боку паяння і на внутрішніх шарах багат шарової друкованої плати, виконують відповідно до рекомендацій ДСТ 23751-86 для конструювання екрана.

Провідники розташовують рівномірно по всій площі друкованої плати так:

- 1) паралельно лінії координатної сітки чи під кутом, кратним 15° ;
- 2) паралельно напрямку руху хвилі припою чи під кутом до нього не більше 30° з боку паяння, якщо основний рисунок не покривають захисною маскою;
- 3) у взаємно перпендикулярних напрямках на сусідніх основних шарах;
- 4) перпендикулярно до дотичної до контуру контактної площадки.

З метою зменшення складності основного рисунка допускається застосування перемичок у кількості не більше 5 % загальної кількості друкованих провідників. Екрани виконують в одній площині з основним рисунком чи як самостійні провідні шари. Всі екрани виконують з вирізами. Площа вирізів повинна

бути не менше 50 % загальної площі екрана, форма вирізів є довільною і визначається конструктором.

Друковані контакти перемикачів розташовують довільно на будь-якій ділянці корисної площі друкованої плати. Розміри і взаємне розташування друкованих контактів виконують відповідно до конструкції перемикача.

Кінцеві друковані контакти розташовують на краю друкованої плати. Розміри контактних площадок і їхнє розташування визначають з технічних умов на з'єднувач.

Усі друковані контакти на платі повинні мати зносостійке покриття, що вказують на кресленні.

2.2 Базисні матеріали для виробництва друкованих плат

Базисні матеріали застосовують для виготовлення друкованих плат у виробництві низьковольтної апаратури, радіотехнічної апаратури, в обчислювальній техніці, приладобудуванні, електроніці, телефонії й у багатьох інших галузях народного господарства.

На сьогодні поряд із традиційним методом виготовлення друкованих плат – субтрактивним (селективне видалення металевого покриття) – застосовуються напівадитивний і адитивний методи виготовлення (гальванічне осадження міді на ділянках відповідно до заданої схеми).

Для напівадитивного й адитивного методів виготовлення друкованих плат використовують електроізоляційні матеріали, облицьовані з однієї чи двох сторін металевою фольгою товщиною 5 мкм чи не облицьовані фольгою.

Друковані плати, що виготовляються на основі базисних матеріалів, можуть бути одно- чи двосторонніми. У цьому випадку найбільшого поширення одержали три основні методи виготовлення:

- метод травлення фольги (хімічний);
- метод хімічного чи гальванічного осадження (електрохімічний);
- комбінований метод (негативний чи позитивний).

Мініатюризація електронної апаратури призвела до створення багатошарових друкованих плат (БДП).

У виробництві БДП найбільшого поширення одержали такі методи виготовлення: відкритих контактних площадок, виступних виводів, попарного пресування, пошарового нарощування, металізації наскрізних отворів і різні комбінації цих методів.

При виготовленні БДП методом металізації наскрізних отворів необхідне очищення отворів перед металізацією. Найбільшого поширення одержав спосіб очищення стінок отворів хімічним підтравлюванням діелектрика в суміші сірчаної і плавикової кислот. Для виготовлення БДП даним методом були створені фольговані діелектрики, що травляться.

Аддитивна технологія виготовлення БДП поділяється на дві групи методів:

- хімічні, у яких нанесення провідників здійснюється шляхом хімічного відновлення іонів металу;

- хіміко-гальванічні (напівадитивні), у яких поряд з хімічним нарощуванням виконується електрохімічне формування провідників.

Для облицювання ізоляційної основи базисних матеріалів застосовується мідна електролітична фольга.

Для склеювання фольги з основою застосовують різні клеї й адгезиви. Клеї й адгезиви наносять на фольгу на спеціальних клеєнаносних машинах з наступним підсушуванням. Товщина клейового шару на фользі 40-50 мкм.

Для матеріалу друкованої плати застосовується буквено-цифрове позначення, наприклад ГФ-2-50 М, СФ-1-35 М.

У цих позначеннях букви означають марку матеріалу ГФ (гетинакс фольгований, СФ (склотекстоліт фольгований), цифра 1 означає, що матеріал облицюваний з однієї сторони фольгою, а цифра 2 – облицюваний із двох сторін фольгою. Наступні потім цифри 20, 35, 50 означають товщину фольги в мікрометрах. У матеріалах, де не зазначена товщина фольги, застосовується фольга товщиною 35 мкм. Буква Г, що стоїть після цифри, означає, що застосовується гальваностійка фольга. Для склотекстоліту теплостійкого для напівадитивної технології марки

СТПА цифра 5 указує товщину фольги, а наступна за нею цифра 1 чи 2 означає, що матеріал облицьований фольгою з однієї чи двох сторін.

Усі марки базисних матеріалів для друкованих плат, крім діелектриків фольгованих ФЛАН (арилокс) і ПКТ (полікарбонат), переважно застосовуються при частотах до 10^6 Гц, ФЛАН і ПКТ – до 10^{10} Гц.

У таблиці 2.5 зазначені фізико-хімічні властивості деяких базисних матеріалів.

Фольгований гетинакс являє собою складний пресований матеріал, виготовлений на основі паперу, просоченою термореактивним зв'язуючим складом, і облицьований з однієї чи двох сторін мідною електролітичною оксидованою чи гальваностійкою фольгою.

Фольговані гетинакси виготовляють аркушами не менше 800x900 мм і товщиною 1,0-3,0 мм.

Фольгований склотекстоліт являє собою складний пресований матеріал, виготовлений на основі тканини зі скляного волокна, просоченої термореактивним зв'язуючим складом, і облицьований з однієї чи двох сторін мідною електролітичною оксидованою чи гальваностійкою фольгою.

Таблиця 2.5 – Фізико-хімічні властивості матеріалів друкованих плат

Найменування матеріалу, марка	Щільність, кг/м ³	Руйнівна напруга при статичному згині перпендикулярно до шарів, МПа		Модуль пружності при розтягуванні, МПа	Руйнівна напруга при розтягуванні, МПа	
		уздовж листа, не менше	поперек листа, не менше		уздовж листа, не менше	поперек листа, не менше
Скло-текстоліт ГОСТ 12652-74				(29-35)*10 ³		
СТ	1600-1850	160	140		90	90
СТ-НТ		140	140		90	90

СТЭФ	1600-1900	390	340		300	200
СТЭД		400	400		300	200
СТЭН		400	340		300	200
СТК		340/320	340/320		220	220
СТВК		140/70	120/60		110	90
СТЭ6	1750-2050	390	340		300	200
СТ-ЭТФ	1700-2000	390	340		250	200
Текстоліт ГОСТ 2910-74				(4,1-6,5) 10^3		
АГ	1300-1450	105	90		50	35
Б		115	100		55	45
В4		90	70/45			
ЛТ	1250-1350	120	110	100	50	
Гетинакс ГОСТ 2718-74				(10-18) 10^3		
І, ІІ, ІІІ	1350-1450	150	135		100	80
Х	1250-1350	80	80		95	65
УІ, УІІ	1300-1450	140	120		110/100	80-70
У	1280-1400	140	120		90	70

Фольговані склотекстоліти виготовляють аркушами розмірами не менше 400х600 мм і товщиною 0,10 – 3,0 мм.

Склотекстоліт усіх марок виготовляють аркушами 400х600 мм товщиною до 1,0 мм.

Склотекстоліт теплостійкий марок СТПА-5-1 і СТПА-5-2 являє собою складний пресований матеріал, виготовлений зі склотканини, просоченої зв'язуючим складом, облицьований з однієї чи двох сторін мідною електролітичною фольгою товщиною 5 мкм із гальваностійким покриттям і захищений зовні мідною чи алюмінієвою фольгою (протектором) товщиною 50-70 мкм.

Склотекстоліт листової марки СТЕК виготовляють без фольги з двостороннім адгезивним шаром.

Фольгований лавсан марки ФЛ-1 являє собою гнучкий матеріал на основі поліетилен-терефталатної плівки,

облицьованої з однієї сторони мідною електричною гальваностійкою фольгою товщиною 35 мкм.

Фольгований поліамід марок ПФ-1 і ПФ-2 являє собою гнучкий матеріал на основі поліамідної плівки, облицьованої з однієї чи двох сторін мідною електролітичною гальваностійкою фольгою товщиною 35 мкм.

Для склеювання окремих шарів багат шарових друкованих плат методом пресування призначена скляна тканина прокладкова (СП), що являє собою скляну тканину, просочену термореактивною зв'язуючою речовиною.

Фольгований діелектрик ФЛАН являє собою листовий матеріал, виготовлений на основі наповненого арилосу, облицьований із двох сторін мідною електролітичною гальваностійкою фольгою товщиною 35 мкм.

Фольгований діелектрик ПКТ являє собою листовий матеріал, виготовлений на основі наповненого полікарбонату, облицьований із двох сторін мідною електролітичною фольгою товщиною 35 мкм.

Надвисокочастотні матеріали виготовляють пресуванням у спеціальних пресформах.

2.3 Розрахунок елементів основного рисунка

Розрахунок основного рисунка зводиться до визначення величини монтажних металізованих і неметалізованих отворів, найменших діаметрів контактних площадок, найменшої відстані між сусідніми контактами площадками для прокладання n -ї кількості провідників між ними. Крім того, повинні бути виконані конструктивно-технологічні розрахунки з постійного (для кола живлення і «землі») і змінного (для сигнальних кіл) струму, на основі яких проектується друкований монтаж, що задовольняє вимоги виробництва, потужності, електричної міцності, перешкодостійкості.

Конструктивно-технологічний розрахунок друкованих плат виконують з урахуванням виробничих похибок рисунка провідних елементів, фотошаблонів, базування, свердління по

ОСТ 4.010.019-81 і ДСТ 23751-86. Номінальний діаметр монтажного отвору розраховується за формулою

$$d=d_b+r+|\Delta d_{\text{нв}}|. \quad (2.1)$$

Мінімальний діаметр контактної площадки розраховується за формулою

$$D=(d+\Delta d_{\text{вв}})+2b+\Delta t_{\text{вв}}+2\Delta d_{\text{мп}}+(\delta d^2+\delta p^2+\Delta t_{\text{нв}})^{1/2}. \quad (2.2)$$

Розрахунок мінімальної відстані для прокладання n -ї кількості провідників між двома отворами з контактними площадками діаметрами D_1 і D_2 здійснюють за формулою

$$l = \frac{D_1 + D_2}{2} + tn + s(n + 1) + \delta l. \quad (2.3)$$

У цих формулах d_b – діаметр виводу елемента, встановлюваного на друковану плату;

r – різниця між мінімальним значенням діаметра отвору і максимальним значенням діаметра виводу встановлюваного елемента ($r=0,1\dots0\dots0,4$ мм);

$\Delta d_{\text{вв}}$, $\Delta d_{\text{нв}}$ – верхнє і нижнє граничні відхилення номінального значення діаметра отвору (таблиця 2.6);

b – гарантійний пасок (таблиця 2.1);

$\Delta t_{\text{вв}}$, $\Delta t_{\text{нв}}$ – верхнє і нижнє граничні відхилення діаметра контактної площадки (таблиця 2.7);

$\Delta d_{\text{мп}}$ – значення підтравлювання діелектрика в отворі (для БДП дорівнює 0,03 мм, для ОПП, ДПП і ГПК – нулю);

δd – значення позиційного допуску розташування осей отворів (таблиця 2.8);

δp – значення позиційного допуску розташування центрів контактних площадок (таблиця 2.9);

δl – значення позиційного допуску розташування друкованого провідника (таблиця 2.10), що враховується тільки при $n>0$;

t – ширина друкованого провідника;

s – відстань між друкованими провідниками чи між друкованим провідником і контактною площадкою (таблиця 2.1).

Усі табличні дані наводяться відповідно до ДСТ 23751-86.

Діаметр монтажних отворів після металізації приблизно можна оцінити за формулою

$$d_m = d_b + (0,14 \dots 0,3), \quad (2.4)$$

при цьому діаметр свердління отвору під металізацію

$$d_{cb} = d_m + (0,1 \dots 0,15). \quad (2.5)$$

Таблиця 2.6 – Граничне відхилення діаметрів монтажних і перехідних отворів

Розмір отвору, мм	Наявність металізації	Клас точності				
		1	2	3	4	5
До 1,0	Немає	±0,10	±0,10	±0,05	±0,05	±0,05
	Є	+0,05 - 0,15	+0,05 - 0,15	+0 -0,10	+0 -0,10	+0 -0,10
Більше 1,0	Немає	±0,15	±0,15	±0,10	±0,10	±0,10
	Є	+0,10 -0,20	+0,10 -0,20	+0,05 -0,15	+0,05 -0,15	+0,05 -0,15

Таблиця 2.7 – Граничні відхилення ширини друкованого провідника, мм

Наявність покриття	Клас точності				
	1	2	3	4	5
Без покриття	±0,15	±0,10	±0,05	±0,03	+0 -0,3
З покриттям	+0,25 -0,20	+0,15 -0,10	±0,10	±0,05	±0,03

Таблиця 2.8 – Значення позиційного допуску розташування осей отворів, мм

Розмір друкованої плати по більшій стороні, мм	Клас точності				
	1	2	3	4	5
До 180 включно	0,20	0,15	0,08	0,05	0,05
180...360	0,25	0,20	0,10	0,08	0,08
Більше 360	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10

Розрахунок за постійним струмом практично виконується для кіл живлення і «землі». Перетин провідника розраховують за припустимим спаданням напруги $U_{\text{п}}$ на провіднику за формулою

$$U_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} \frac{l_{\text{п}}}{ht} J_{\text{п}}, \quad (2.6)$$

де $\rho_{\text{п}}$ – питомий опір провідника, Ом·м (таблиця 2.11);

h, t – відповідно товщина фольги і ширина друкованого провідника, м;

$l_{\text{п}}$ – максимальна довжина друкованого провідника кіл живлення чи «землі», отримана в результаті трасування, м;

$J_{\text{п}}$ – струм, що протікає через друкований провідник (визначається з умов роботи електричної принципової схеми), А.

Таблиця 2.9 – Значення позиційного допуску розташування контактних площадок, мм

Вид виробу	Розмір друкованої плати по більшій стороні, мм	Клас точності				
		1	2	3	4	5
ОПП, ДПП, ГПК, БДП (зовнішній шар)	До 180 включно	0,35	0,25	0,15	0,10	0,05
	180...360	0,40	0,30	0,20	0,15	0,08
	Більше 360	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
БДП (внутрішній шар)	До 180 включно	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10
	180...360	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
	Більше 360	0,50	0,40	0,30	0,25	0,20

Таблиця 2.10 – Значення позиційного допуску розташування друкованого провідника, мм

Вид виробу	Клас точності				
	1	2	3	4	5
ОПП, ДПП, ГПК, БДП (зовнішній шар)	0,20	0,10	0,05	0,03	0,02
БДП (внутрішній шар)	0,30	0,15	0,10	0,08	0,05

Таблиця 2.11 – Питомий електричний опір металів

Метал	Питомий електричний опір , 10^{-8} Ом·м
Мідна фольга	1,72
Гальванічна мідь	1,90
Хімічна мідь	2,80
Золото	2,22
Паладій	10,80
Нікель	7,80
Срібло	1,59
Олово	11,50

Для мікросхем припустиме відхилення напруги живлення може складати до 5 % ($U_{\text{п}}=0,05E$), для логічних схем припустиме спадання напруги в колах живлення і «землі» не повинне перевищувати 1-2 % номінального значення напруги E , яка підводиться, тобто за формулою

$$U_{\text{п}}=(0,01\dots0,02)E. \quad (2.7)$$

Вимоги до електричних параметрів друкованих плат і ГПК необхідно виконувати за ДСТ 23751-86.

При визначенні опору провідників, що мають додаткове покриття товщиною менше 12 мкм із відносно високим питомим опором (наприклад, нікель, олово, паладій), як правило, розраховують тільки опір мідного шару, а опір покриттів не беруть до уваги. При товщині додаткового покриття більше 12 мкм опір провідника визначають як суму опорів окремих шарів. Опір мідного провідника з додатковим мідним покриттям розраховують виходячи з їхньої сумарної товщини.

Припустиму щільність електричного струму в друкованому провіднику залежно від припустимого перевищення температури провідника відносно температури навколишнього середовища вибирають для фольги – від $100 \cdot 10^6$ до $250 \cdot 10^6$ А/м², для гальванічної міді – від $60 \cdot 10^6$ до $100 \cdot 10^6$ А/м².

Припустиме струмове навантаження варто зменшити на 15 % для провідників, розташованих на відстані один від одного,

що дорівнює або менше від їхньої ширини і виконаних напівадитивним чи адитивним методом.

Перевірочні розрахунки за постійним струмом й оцінка електричних параметрів друкованих плат можуть призвести до зміни рисунка і ширини друкованого провідника. Тому при обмеженій кількості шарів друкованої плати трасування сигнальних кіл рекомендується виконувати в останню чергу. Відповідно до рекомендацій [6] трасування кіл живлення і «землі» доцільно проводити в окремих шарах. Це, звичайно, збільшує кількість шарів друкованої плати, але підвищує перешкодозахищеність і електричну міцність плат.

Для сигнальних кіл розрахунок за постійним струмом не потрібен. Мінімальна ширина провідника диктується технологічними можливостями виробництва (ОСТ 4.010.019-81; ДСТ 23751-79). Розрахунок сигнальних кіл за змінним струмом виконується для оцінки перешкодостійкості [4].

2.4 Оцінка віброміцності конструкції ЕА (електронної апаратури)

При проектуванні конструкцій друкованих плат, блоків, панелей, рам і стійок ЕА виникає необхідність виконання розрахунків для визначення міцності конструкції, обчислення резонансних частот і навантажень, що виникають у процесі експлуатації ЕА. Конструкції ЕА є складними пружними механічними системами з нескінченною кількістю ступенів свободи. У багатьох випадках розрахунок таких систем стає можливим при заміні спрощеною системою, більш простою, з іншим розподілом мас і жорсткостей.

У конструкціях ЕА (плати, стійки і т. д.) часто як деталі, що несуть механічні навантаження, застосовуються стрижневі каркаси й окремі стрижні і пластини. Таким чином, реальні конструкції можна замінити еквівалентними схемами балок і пластин, способи розрахунку яких докладно досліджені й описані.

До балкових елементів відносять пружні тіла призматичної форми, висота (товщина) яких мала порівняно з довжиною. Кінці можуть бути жорстко затиснені (прогин і кут повороту дорівнюють нулю), обперті (прогин і згинальний момент в опорі дорівнюють нулю), вільні (згинальний момент і сила, що перерізує, дорівнюють нулю). Зварювання і паяння дорівнюють до жорсткого защемлення, гвинтове закріплення відносять (із запасом) до опори, а при великій кількості гвинтів – до защемлення).

До елементів пластинчастої форми відносять пружні тіла призматичної форми, висота (товщина) яких мала порівняно з розмірами основ. Кріплення пластин до опори може бути жорстким і рухливим. Жорстке кріплення (немає кутових і лінійних переміщень) забезпечується паянням, затисканням і в деяких випадках притисненням чи кріпленням гвинтами. Шарнірна опора (немає лінійного переміщення, але можливий поворот по обпертій стороні) забезпечується установленням у напрямних і в деяких випадках закріпленням гвинтами чи з'єднувачем.

На вільній стороні пластини можливі лінійні і кутові переміщення. До пластинчастих елементів ЕА зазвичай прикладено розподілене навантаження. Товщина друкованої плати визначається товщиною вихідного матеріалу і вибирається залежно від використовуваної елементної бази і діючих механічних навантажень за формулою

$$\sigma_{32} = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma_{32}] , \quad (2.8)$$

де M_{\max} – максимальний згинальний момент, Нм;

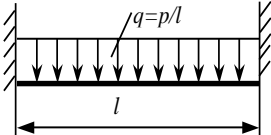
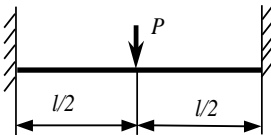
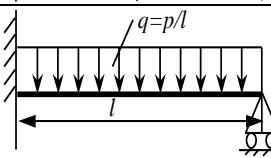
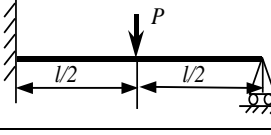
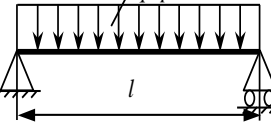
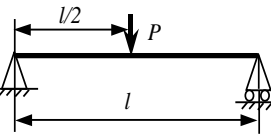
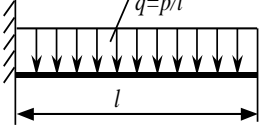
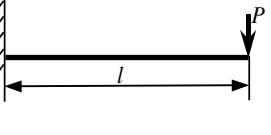
W – момент опору, м³;

$[\sigma_{32}]$ – припустима згинальна напруга для матеріалу плати, Н/м² (таблиця 2.5).

Кращими значеннями номінальних товщин одно- і двосторонніх друкованих плат є 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм.

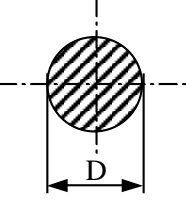
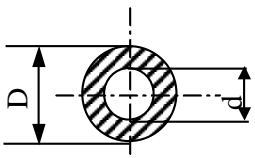
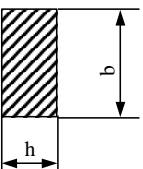
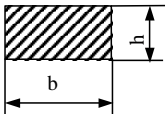
Значення максимального прогину δ_{\max} і моменту M_{\max} наведено в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 - До розрахунку балкових конструкцій

Ескіз	Кріплення та навантаження	Максимальний згинальний момент, M_{\max}	Прогин, δ_{\max}
	Балка з жорстко зашкеленими кінцями та розподіленим навантаженням	$\frac{Pl}{12}$	$\frac{Pl^3}{384EJ}$
	Те саме з зосередженим навантаженням	$\frac{Pl}{8}$	$\frac{Pl^3}{192EJ}$
	Балка з жорстко зашкеленим одним кінцем, опертим другим і розподіленим навантаженням	$\frac{Pl}{8}$	$0,0054 \frac{Pl^3}{EJ}$
	Те саме з зосередженим навантаженням	$\frac{3Pl}{16}$	$0,0093 \frac{Pl^3}{EJ}$
	Балка з обпертими кінцями та розподіленим навантаженням	$\frac{Pl}{8}$	$\frac{5Pl^3}{384EJ}$
	Те саме з зосередженим навантаженням, прикладеним на відстані l від точки закріплення	$\frac{Pl}{4}$	$\frac{Pl^3}{48EJ}$
	Балка з консольним закріпленням і розподіленим навантаженням	$\frac{Pl}{2}$	$\frac{Pl^3}{8EJ}$
	Те саме з зосередженим навантаженням, прикладеним на відстані l від точки закріплення	Pl	$\frac{Pl^3}{3EJ}$

Розрахунок моменту інерції J і моменту опору W можна виконати за формулами таблиці 2.13.

Таблиця 2.13 – Параметри балкових елементів

Ескіз	Момент інерції, J	Момент опору, W
	$\frac{\pi D^4}{64}$	$\frac{\pi D^3}{32}$
	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$
	$\frac{hb^3}{12}$	$\frac{hb^2}{6}$
	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^2}{6}$

Частота власних коливань деталей типу пластини для різних варіантів кріплення може бути подана як

$$f_0 = \frac{Ch}{l^2} 10^2, \quad (2.9)$$

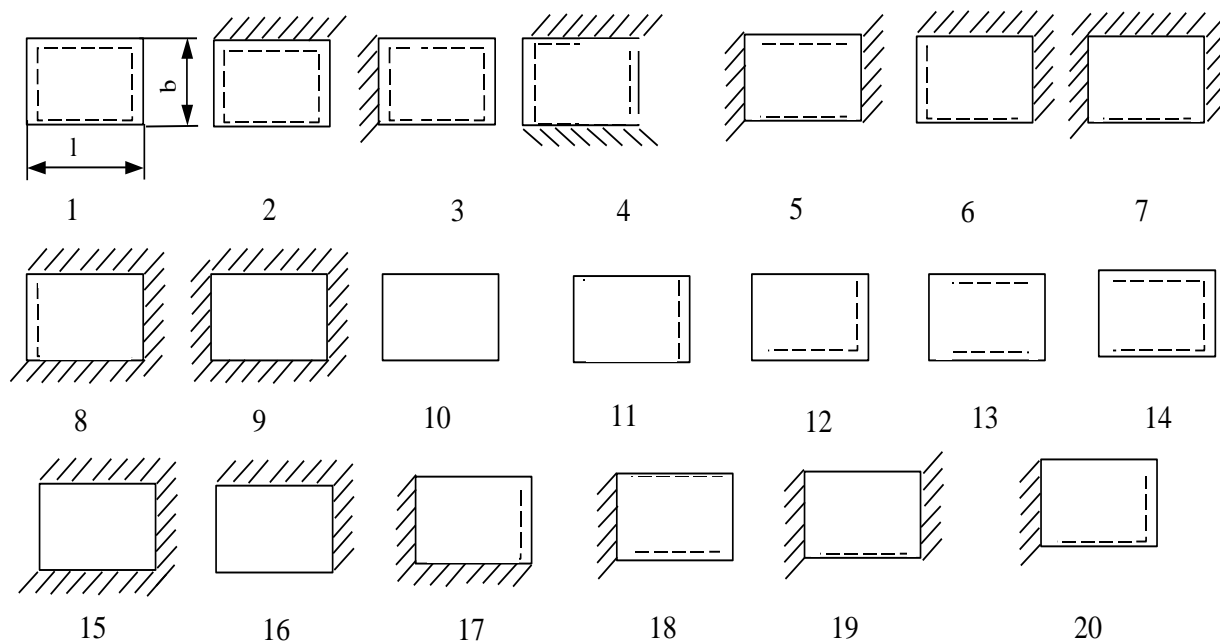
де C – частотна постійна сталеві пластини, що залежить від варіанта закріплення і співвідношення сторін l/b ;

h – товщина матеріалу пластини, м;

l – довжина пластини, м;

b – ширина пластини, м.

На рисунку 2.1 зображено можливі схеми закріплення пластин, у якості яких можуть виступати плати, касети, стінки блоків.



1 – усі сторони вільно обперті; 9 – усі сторони затиснені (жорстко заділені); 10 – усі сторони вільні від опор; інші схеми закріплення являють собою різні поєднання зазначених способів

Рисунок 2.1 – Схеми закріплення пластин

У таблиці 2.14 наведено значення постійної C .

Якщо пластина виконана не зі сталі, то у вирази (2.2) необхідно ввести поправковий коефіцієнт за формулою

$$k_m = \sqrt{\frac{E\rho_c}{E_c\rho}}, \quad (2.10)$$

де E , E_c – модулі пружності застосованого матеріалу і сталі, Н/м^2 ;

ρ , ρ_c – щільності застосованого матеріалу і сталі, кг/м^3 .

Нерівномірність розподілу маси елементів на пластині (наприклад, за рахунок навісних елементів) враховується за допомогою поправкового коефіцієнта (названого коефіцієнтом впливу) за формулою

$$k_e = \frac{1}{\sqrt{1 + m_e/m_n}}, \quad (2.11)$$

де m_e – маса елементів, рівномірно розподілених по пластині, кг;

m_{Π} – маса пластини, кг.

Таблиця. 2.14 – Значення частотної постійної С

Схема кріплення пластини (дивись рисунок 2.1)	Відношення сторін пластини l / b							
	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4
1	25	29	47	76	117	170	234	375
2	25	31	56	101	165	245	347	603
3	40	41	56	84	124	176	240	864
4	26	33	69	136	267	346	492	864
5	54	56	69	93	131	181	244	406
6	38	42	65	107	170	251	351	607
7	54	58	76	115	175	254	353	607
8	33	44	76	139	230	349	494	866
9	54	58	86	145	234	352	497	868
10	8	17	34	51	67	84	101	135
11	4	8	17	25	34	42	51	67
12	2	4	8	13	17	21	25	34
13	8	16	38	70	112	165	230	394
14	4	10	28	58	99	151	216	380
15	10	19	58	124	217	336	479	855
16	9	11	18	28	43	62	85	144
17	10	16	42	88	152	134	335	591
18	9	10	13	18	23	28	33	43
19	5	16	56	122	215	335	481	853
20	5	12	40	86	150	233	333	590

З урахуванням цих поправкових коефіцієнтів вирази (2.2) набувають вигляду

$$f_0 = k_m k_b \frac{Ch}{l^2} 10^2. \quad (2.12)$$

Наближений розрахунок власної частоти коливань плати, закріпленої в декількох точках, при рівномірно розподіленій масі елементів визначається за формулою (ОСТ 4.ГО.010.009)

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + m_e / m_{\Pi}}} \frac{\pi(1 + \Delta^2)}{4\sqrt{3}} \frac{\lambda_k h}{b^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.13)$$

де m_e – маса навісних елементів;

m_{Π} – маса плати;

Δ - відношення меншої сторони плати до більшої сторони
 $\Delta = b/l$;

h – товщина плати;

ρ - щільність матеріалу плати;

λ_k – коефіцієнт, що залежить від способу кріплення друкованої плати.

Якщо плата закріплена по кутах у чотирьох точках, $\lambda_k = 1,0$. При закріпленні плати в п'ятьох точках (чотири закріплення по кутах і одне в центрі плати) $\lambda_k = 2,5$. При закріпленні плати в шести точках по периметру (чотири – по кутах і два закріплення по середині більшої сторони) $\lambda_k = 2,0$.

Оцінні розрахунки віброміцності виконуються в такій послідовності [3]:

- 1) вибір розрахункових моделей елементів конструкції;
- 2) визначення власної частоти f_0 для моделі;
- 3) визначення амплітуди коливань на частоті f_0 за формулою

$$a_{розр} = \frac{K_{вб} g}{4\pi^2 f_0^2}, \quad (2.14)$$

де $K_{вб}$ – коефіцієнт вібраційного перевантаження,

$$K_{вб} = \frac{f_0 n_v}{f_{vmax}}; \quad (2.15)$$

n_v – вібраційне перевантаження;

f_{vmax} – максимальна задана частота вібрації, Гц;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

- 4) визначення переміщення елемента при резонансі за формулою

$$\delta_0 = K_{дин} a_{розр}, \quad (2.16)$$

де $K_{дин}$ – коефіцієнт динамічності,

$$K_{дин} = \frac{1}{\sqrt{(1 - K_f^2)^2 + K_f^2 \varepsilon^2}}; K_f = \frac{f_i}{f_0}; \quad (2.17)$$

f_i – частота коливань для різних ступенів свободи розрахункової моделі;

ε - показник загасання.

При малому ε і $K_f \approx 1$ (навколорезонансна область) $K_{дин}$ визначається за формулою

$$K_{дин} \cong \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\pi}{\xi}, \quad (2.18)$$

де ξ – логарифмічний декремент загасання (для елементів зі склотекстоліту $\xi=0,2$);

5) визначення навантаження P , випробованого елементом при f_0 , з урахуванням згинального моменту M_{max} (таблиця 2.12) і напруг від дії M_{max} (2.7) (для визначення навантаження P припускаємо, що $\delta_0 = \delta_{max}$);

б) порівняння отриманих значень границі витривалості σ_{-1} з межею міцності матеріалу $\sigma_{-1} = (0,2 \dots 0,4) \sigma_{пр}$.

Якщо з розрахунку з'ясовується, що вібростійкість конструкції ЕА недостатня, то вводять додаткові кріплення, ребра жорсткості, відбортовки, замкнуті коробчаті конструкції. Можна використовувати конструкційні матеріали з гарними властивостями, що демпфірують (наприклад, магнієві сплави) чи спеціальні демпфірувальні покриття.

При конструюванні ЕА необхідно прагнути того, щоб власні частоти коливань ЕА знаходилися поза заданим діапазоном діючих частот вібрації і не менш, ніж у півтора–два рази перевищували максимальну частоту вібрації (правило «октави»). Якщо ж наблизений розрахунок показав, що власна частота не перевищує заданої, то слід не уточнювати розрахунок, а змінити конструкцію апаратури з метою підвищення її власної частоти.

Для цього можна вибрати інший матеріал конструкції, змінити габаритні розміри і схему закріплення. При цьому, якщо власна частота знаходиться поза діапазоном діючих на ЕА частот і резонансні явища не виникнуть, немає необхідності продовжувати розрахунок і вибирати систему амортизації.

Конструювання системи амортизації починається з вибору типу амортизаторів і схеми їхнього розміщення. Вибір амортизаторів роблять виходячи з припустимого навантаження і граничних значень параметрів, що характеризують умови експлуатації. Вибір схеми розташування амортизаторів залежить від розташування апаратури на об'єкті й умов динамічного впливу. Розрахунок амортизаторів включає визначення сил реакцій амортизаторів і величин статичного прогину, за якими вибирають потрібний типорозмір амортизатора [1, 3, 8].

3 ТЕПЛОФІЗИЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЕА

3.1 Загальні положення

Під тепловим режимом радіоелемента, вузла, блока, приладу розуміється їхній температурний стан, тобто просторово-тимчасовий розподіл температури в елементі, вузлі, блоці, приладі. Значне відхилення температури приладу від нормальної, особливо в позитивну область, викликає різке зниження надійності приладу.

Тепловий режим електронних апаратів (ЕА) визначається багатьма факторами. Істотний вплив на нього мають виділення тепла самої ЕА, тобто електричний режим роботи ЕА (внутрішні теплові впливи), а також конструкція і габарити приладів, що входять до ЕА, властивості середовища усередині приладу, особливості системи охолодження, властивість матеріалів, з яких виготовлено прилад. Наведені фактори враховують при розрахунку теплового режиму апаратури. Отриманий у результаті розрахунку розподіл температур порівнюють із припустимим і роблять висновки про раціональність обраної

конструкції з погляду теплового режиму при експлуатації в заданих умовах.

Для вибору способу охолодження на стадії ескізної чи технічної пропозиції враховують такі дані, обговорені в ТЗ: сумарна потужність P_{σ} , що розсіюється в блоці; діапазон можливої зміни температури навколишнього середовища $T_{\text{сmax}}$, $T_{\text{сmin}}$; межі зміни тиску навколишнього середовища P_{max} , P_{min} ; час безупинної роботи τ ; допустимі температури елементів T_i . Крім того, необхідно знати коефіцієнт заповнення приладу

$$K_z = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V},$$

де V_i – об'єм i -го друкованого вузла чи блока електронного пристрою;

n – кількість друкованих вузлів чи блоків;

V – об'єм, що займає електронний пристрій;

L_1 , L_2 , L_3 – горизонтальні і вертикальні розміри корпусу ЕА відповідно.

Коефіцієнт заповнення приладу характеризує ступінь корисного використання об'єму і є одним з головних показників якості конструкції. Коефіцієнт заповнення має бути зазначений у ТЗ чи може бути обраний на підставі досвіду конструювання подібних пристроїв. Для реальної ЕА коефіцієнт заповнення об'єму знаходиться в межах від 0,2 до 1. Основні розміри корпусу ЕА можна визначити наближеними розрахунками компонування ЕА [1, 3]. Ці вихідні дані недостатні для детального розрахунку теплового режиму, але їх можна використовувати для попередньої оцінки.

Вибір способу охолодження на ранній стадії конструювання можна виконати на підставі питомої потужності

$$q = \frac{P_{\sigma}}{S_k},$$

де S_k – площа всієї поверхні приладу,

$$S_k=2(L_1L_2+L_2L_3+L_1L_3).$$

Найбільш повно задача вибору способу охолодження розроблена для природного і примусового повітряного охолодження.

Відповідно до роботи [1] системи охолодження за фізичним станом навколишнього середовища можуть бути: природно повітряними при $q \leq 0,2 \cdot 10^4$ Вт/м²; примусово повітряними при $q \leq 1 \cdot 10^4$ Вт/м²; рідинними при $q \leq 20 \cdot 10^4$ Вт/м²; випарними при $q \leq 200 \cdot 10^4$ Вт/м².

Якщо попередні розрахунки показують, що повітряним охолодженням, навіть примусовим, не вдається зменшити температуру до бажаної, то застосовують рідинне чи випарне охолодження.

До складу ЕА в більшості випадків входять напівпровідникові діоди і транзистори, мікросхеми, резистори, конденсатори, трансформатори й інші подібні елементи, встановлені або на металевому шасі, або на друкованих платах у приладах касетної конструкції.

Для розглянутого класу приладів існує значна кількість методик розрахунку, що мають різну точність і трудомісткість. Чим вище точність, тим нижче імовірність одержання похибки. Тому необхідно одержати співвідношення, що зв'язують імовірність одержання неправильного результату з точністю методики. За допомогою цих співвідношень можна вирішити питання про допустиму похибку розрахунку теплового режиму ЕА. Розрахунок теплового режиму ЕА рекомендується проводити у два етапи.

На першому етапі визначаються середньоповерхневі температури плати з розташованими на ній радіодеталлями, кожуха і температура повітря усередині електронного приладу.

На другому етапі, використовуючи результати першого етапу, визначаються середньоповерхневі температури корпусів елементів.

Існуючі методики розрахунку теплового режиму ЕА з повітряним охолодженням, як правило, поділяються на методики розрахунку для приладів на шасі і методики розрахунку для апаратури касетної конструкції. Однак є принципова можливість створення єдиної методики розрахунку.

Реальний електронний прилад у теплофізичному відношенні являє собою дуже складну систему з великою кількістю джерел тепла з границями неправильної форми. Повну систему управління теплообміну для реального приладу часто неможливо не тільки вирішити аналітично, але і записати математично. У зв'язку з цим процеси, що протікають у реальному електронному приладі, схематизують, приймають ряд передумов, що спрощують, і в результаті одержують теплову модель приладу, для якої і проводять розрахунок теплового режиму.

На сьогодні найбільшого поширення одержала дуже плідна схематизація процесів теплообміну в ЕА [10]. Сутність цього методу полягає в тому, що шасі (плата, пакет плат) з радіоелементами приймають за одне тіло з ізотермічною поверхнею (нагрітою зоною), для якого і проводиться розрахунок теплового режиму. Залежно від конструкції електронного приладу в ньому можуть бути виділені одна чи кілька нагрітих зон. За допомогою цього методу визначають середньоповерхневу температуру нагрітої зони.

Гранично допустиму температуру для проектного електронного пристрою необхідно визначити заздалегідь на підставі аналізу допустимих температур елементів чи вимог з надійності. У технічних умовах (ТУ) на кожен елемент указується гранично допустима температура на його поверхні T_{ki} , або температура повітря біля елемента T_{vi} . У результаті аналізу гранично допустимих температур, елементів, застосовуваних у даній ЕА, можна виділити їхнє найменше значення, що потім приймається в якості гранично допустимого для ЕА.

При задаванні теплового режиму ЕА – температури повітря, що оточує елементи, необхідно зменшити всі температури на 5-

15 К відносно заданого в ТЗ і ТУ, щоб гарантувати відповідність теплового режиму ЕА заданому в ТЗ.

При розв'язанні теплофізичних задач з забезпечення теплового режиму і вибору способу охолодження ЕА повинні дотримуватися такі умови:

– для ЕА із шасі

$$T_3 < T_{3 \text{ доп}} \text{ чи } T_B < T_{B \text{ доп}} ;$$

– для ЕА касетної конструкції

$$T_{O3} < T_{O3 \text{ доп}} \text{ чи } T_{B3} < T_{B3 \text{ доп}} ,$$

де $T_{3 \text{ доп}} = (T_{ki})_{\min}$, $T_{B \text{ доп}} = (T_{vi})_{\min}$;

T_{O3} і T_{OB} – температури поверхонь центральних плат ЕА (нагрітої зони) і повітря між ними відповідно.

3.2 Розрахунок теплового режиму ЕА при природному повітряному охолодженні

Тепловий режим ЕА при природному повітряному охолодженні залежить від багатьох факторів. Зв'язок між перегрівом нагрітої зони і факторами, що впливають, можна подати як

$$\vartheta_3 = \prod_i K_i ,$$

де ϑ_3 – перегрів нагрітої зони відносно температури навколишнього середовища, а кожен коефіцієнт K_i залежить від одного параметра (фактора), що впливає на величину ϑ_3 .

Величина перегріву нагрітої зони приладів у герметичному і перфорованому корпусах, що працюють при нормальному атмосферному тиску і за відсутності зовнішнього обдуву корпусу і внутрішнього перемішування повітря, визначається в основному питомою потужністю нагрітої зони і коефіцієнтом перфорації, тобто

$$\vartheta_3 = K_{q3} K_{\Pi} ,$$

де K_{q_3} – коефіцієнт, що залежить від питомої потужності нагрітої зони;

K_{Π} – коефіцієнт, що залежить від коефіцієнта перфорації.

Питому потужність нагрітої зони можна обчислити як частку від ділення потужності P_3 , що розсіюється нагрітою зоною, на умовну поверхню нагрітої зони S_3 :

$$q_3 = \frac{P_3}{S_3}, \quad (3.1)$$

де S_3 – умовна поверхня нагрітої зони,

$$S_3 = 2[L_1L_2 + (L_1 + L_2)L_3K_3]. \quad (3.2)$$

де L_1, L_2 – горизонтальні розміри корпусу приладу;

L_3 – вертикальний розмір корпусу приладу;

K_3 – коефіцієнт заповнення об'єму.

Коефіцієнт перфорації визначається як відношення площі перфораційних отворів S_{Π} до площі основ корпусу апарата:

$$\Pi = \frac{S_{\Pi}}{2L_1L_2}. \quad (3.3)$$

При створенні методики розрахунку використовувалися експериментальні дані по теплових режимах реальних ЕА різного конструктивного виконання (на шасі, з касетами і змішаної конструкції). Прилади мали герметичний чи перфорований корпус. Тепловий режим цих ЕА визначається при нормальному і зниженому атмосферному тиску, причому в деяких випадках для інтенсифікації теплообміну застосовувалися або зовнішній обдув корпусу, або внутрішнє перемішування повітря. З аналізу експериментальних даних випливає, що перегрів нагрітої зони нелінійно зростає зі збільшенням питомої потужності зони і зменшується зі збільшенням коефіцієнта перфорацій, асимптотично наближаючись до деякої постійної величини. Тому поведінку K_{q_3} і K_{Π} можна описати залежностями вигляду

$$K_{q_3} = a_1 q_3 + a_2 q_3^2 + a_3 q_3^3,$$

$$K_{\Pi} = a_2 + \frac{1}{a_3 + a_4 \Pi} \quad (3.4)$$

і обчислити їх за формулами

$$K_{q_3} = 0,1390 q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3} q_3^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} q_3^3,$$

$$K_{\Pi} = 0,29 + \frac{1}{0,41 + 4,95 \Pi}.$$

Залежності K_{q_3} і K_{Π} від q_3 і Π показані на рисунках 3.1 і 3.2 (на рисунку 3.1 $K_{q_3} = \vartheta_2$).

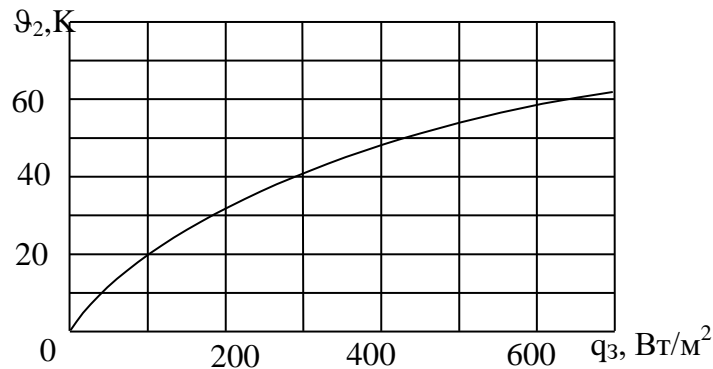


Рисунок 3.1 – Залежність перегріву нагрітої зони від питомої потужності розсіювання

Аналогічно було знайдено вирази для визначення перегріву корпусу герметичного приладу ($\vartheta_1 = K_{q_k}$), що працює в нормальних умовах. Цей перегрів залежить від питомої потужності корпусу приладу q_k :

$$q_{qk} = P_3 / S_k, \quad (3.5)$$

де $S_k = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2)L_3].$ (3.6)

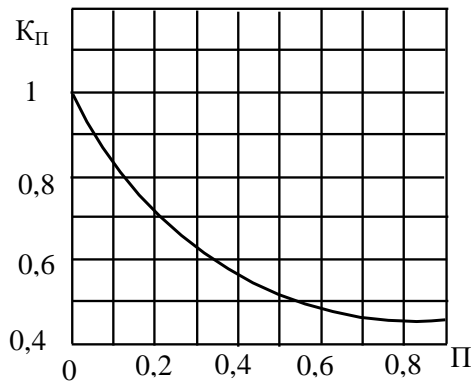


Рисунок 3.2 – Залежність K_{Π} від коефіцієнта перфорації

З використанням експериментальних даних рівняння для K_{qk} має вигляд

$$K_{qk} = \vartheta_1 = 0,1472q_k - 0,2962 * 10^{-3} q_k^2 + 0,3127 * 10^{-6} q_k^3$$

і графічно зображено на рисунку 3.3.

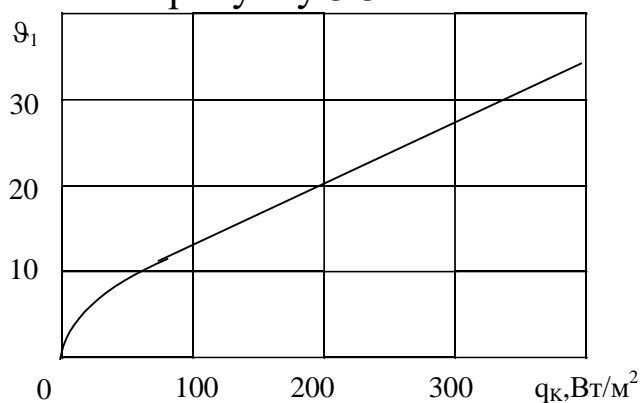


Рисунок 3.3 – Залежність перегріву корпусу від питомої потужності

Наявність зовнішнього обдуву і зміна атмосферного тиску зовні впливає на величину перегріву корпусу ϑ_1 відносно температури навколишнього середовища. За наявності внутрішнього перемішування і зміни атмосферного тиску усередині корпусу змінюється величина перегріву ($\vartheta_2 - \vartheta_1$) нагрітої зони відносно температури корпусу приладу.

У загальному випадку перегрів нагрітої зони

$$\vartheta_3 = \vartheta_1 K_{H1} K_v + (\vartheta_2 - \vartheta_1) K_{H2} K_w,$$

де K_{H1} – коефіцієнт, що залежить від величини атмосферного тиску зовні корпусу приладу H_1 ;

K_v – коефіцієнт, що залежить від швидкості зовнішнього обдуву корпусу приладу;

K_{H2} – коефіцієнт, що залежить від величини атмосферного тиску усередині корпусу приладу H_2 ;

K_w – коефіцієнт, що залежить від швидкості перемішування повітря в приладі w ;

$$w = a \frac{G_6}{V_6}, \quad (3.7)$$

де G_B – продуктивність вентилятора;

V_B – об'єм повітря в приладі;

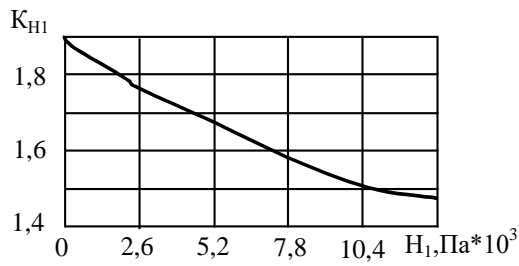
$a=0,6$ м⁴/кг.

З огляду на те що зі збільшенням тиску середовища усередині і поза корпусом приладу, швидкостей зовнішнього обдуву і внутрішнього перемішування перегрів нагрітої зони зменшується (коефіцієнти K_{H1} , K_v , K_{H2} і K_w на рисунках 3.4-3.7), знайдені з використанням експериментальних даних по тепловим режимам реальних ЕА рівняння для розрахунку коефіцієнтів K_{H1} , K_v , K_{H2} і K_w мають такий вигляд:

$$K_{H1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 * 10^{-5} H_1}; \quad K_v = \frac{1}{1 + 0,347v};$$
$$K_{H2} = 0,8 + \frac{1}{1,25 + 3,8 * 10^{-5} H_2}; \quad K_w = 0,08 + \frac{1}{1,09 + 0,27w}.$$

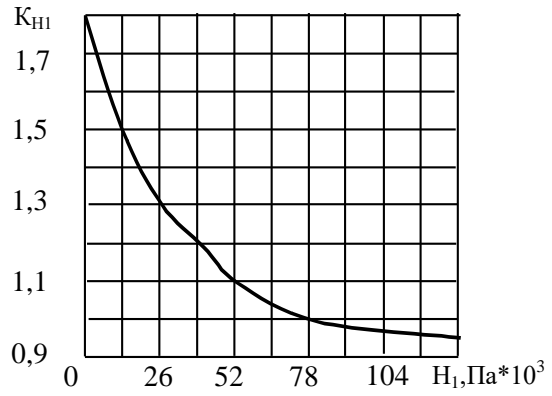
Залежності цих коефіцієнтів від тисків показані на рисунках 3.4 – 3.7. Представлені вище коефіцієнти отримані в такому діапазоні застосування вихідних даних:

$$\begin{array}{ll} 0 \leq q_3 \leq 600 \text{ Вт/м}^2; & 0 \leq P \leq 0,8; \\ 0 \leq q_k \leq 400 \text{ Вт/м}^2; & 700 \leq H \leq 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}; \\ 0 \leq v \leq 3,0 \text{ м/с}; & 0 \leq w \leq 4,0 \text{ м/с}. \end{array}$$



а

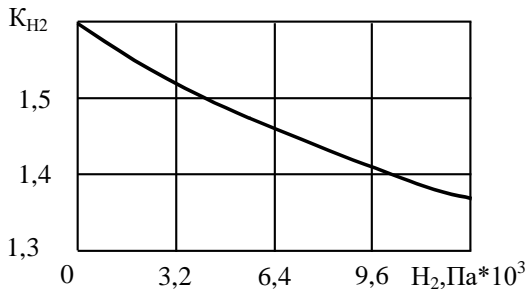
а) $0 \leq H_1 \leq 13 \cdot 10^3 \text{ Па}$;



б

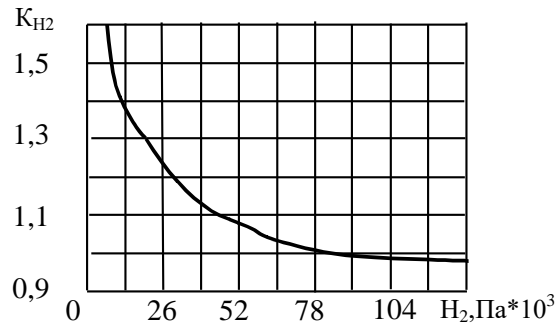
б) $0 \leq H_1 \leq 130 \cdot 10^3 \text{ Па}$

Рисунок 3.4 – Залежність K_{H1} від тиску навколишнього середовища



а

а) $0 \leq H_2 \leq 12,8 \cdot 10^3 \text{ Па}$;



б

б) $0 \leq H_2 \leq 130 \cdot 10^3 \text{ Па}$

Рисунок 3.5 – Залежність K_{H2} від тиску середовища усередині апаратури

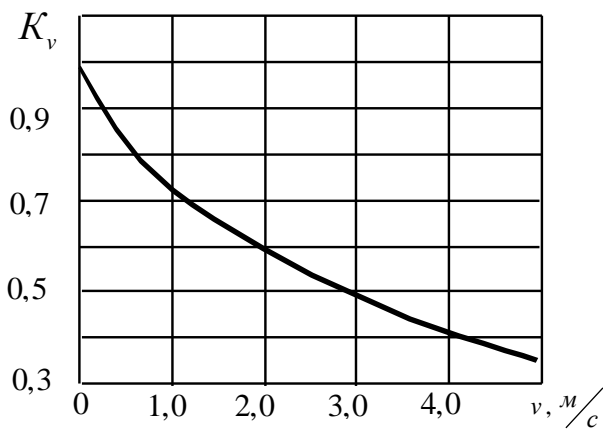


Рисунок 3.6 – Залежність K_v від швидкості обдуву

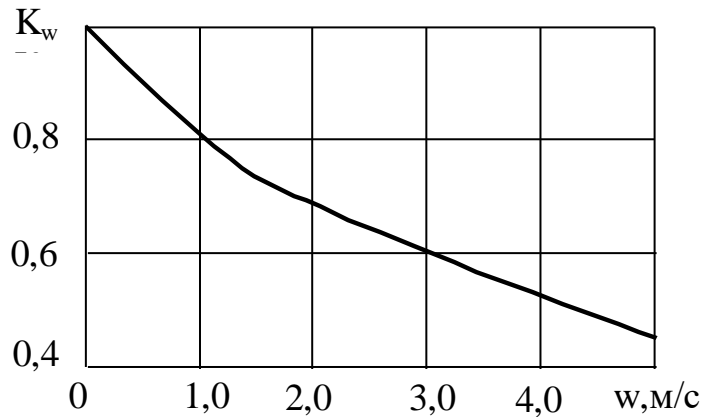


Рисунок 3.7 – Залежність K_w від швидкості перемішування

При визначенні виду залежності величини перегріву поверхні елемента відносно температури навколишнього середовища виходимо з таких міркувань: тепловий потік, що розсіюється елементом, надходить у нагріту зону й у навколишнє середовище, тобто

$$P_{EL} = \sigma_{ELZ}(\vartheta_{EL} - \vartheta_3) + \sigma_{ELC}\vartheta_{EL}, \quad (3.8)$$

де P_{EL} – тепловий потік, що розсіюється елементом;

ϑ_{EL} – перегрів поверхні елемента відносно температури навколишнього середовища;

ϑ_3 –перегрів нагрітої зони відносно температури навколишнього середовища;

σ_{ELZ} –теплова провідність між поверхнею елемента і нагрітою зоною;

σ_{ELC} –теплова провідність між поверхнею елемента і навколишнім середовищем.

З виразу (3.8) випливає, що

$$\vartheta_{EL} = \vartheta_3 \left[\frac{\sigma_{ELZ}}{\sigma_{ELZ} + \sigma_{ELC}} + \frac{P_{EL}}{\vartheta_3(\sigma_{ELZ} + \sigma_{ELC})} \right], \quad (3.9)$$

тому що

$$g_3 = P_3 / \sigma_{3C}, \quad q_{EL} = P_{EL} / S_{EL}, \quad q_3 = P_3 / S_3,$$

де σ_{3C} – теплова провідність між нагрітою зоною і навколишнім середовищем;

S_{EL} – площа поверхні елемента, що віддає тепло (за наявності радіатора враховується і поверхня радіатора).

З огляду на викладене вище, вираз (3.9) можна переписати так:

$$g_{EL} = g_3 \left[\frac{\sigma_{ELB}}{\sigma_{ELB} + \sigma_{ELC}} + \frac{q_{EL} \sigma_{3C} S_{EL}}{q_3 S_3 (\sigma_{ELB} + \sigma_{ELC})} \right], \quad (3.10)$$

тобто перегрів поверхні елемента можна представити у вигляді

$$g_{EL} = g_3 \left(a + b \frac{q_{EL}}{q_3} \right). \quad (3.11)$$

Знайдені методом найменших квадратів з використанням експериментальних даних по теплових режимах реальних ЕА коефіцієнти a і b дорівнюють $a=0,75$; $b=0,25$.

Формула (3.10) не враховує особливостей монтажу елементів. Розроблення методики, що враховує особливості монтажу і конструкції елемента, дозволить підвищити точність розрахунку температури поверхні елемента.

Наведені залежності дозволяють визначити середньповерхневу температуру нагрітої зони і температуру поверхні елементів ЕА при природному повітряному охолодженні.

3.3 Порядок розрахунку теплового режиму блока в герметичному корпусі

1 Розраховують поверхню корпусу блока за формулою (3.6), де L_1, L_2 – горизонтальні розміри корпусу блока; L_3 – вертикальний розмір корпусу блока (рисунок 3.8).

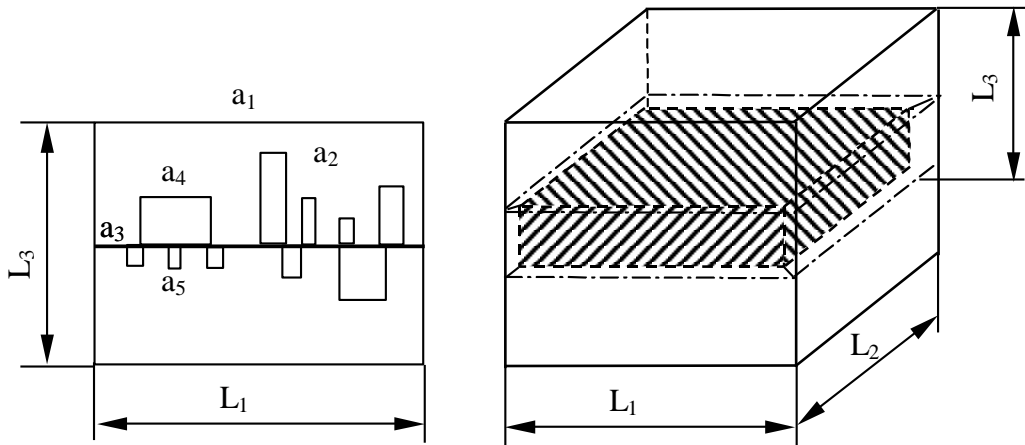


Рисунок 3.8 – Схеми блока в герметичному виконанні

2 Визначають умовну поверхню нагрітої зони за виразом (3.2).

3 Визначають питому потужність корпусу блока за формулою (3.5).

4 Розраховують питому потужність нагрітої зони за виразом (3.1).

5 Знаходять коефіцієнт \mathcal{G}_1 залежно від питомої потужності корпусу блока (дивись рисунок 3.3).

6 Знаходять коефіцієнт \mathcal{G}_2 залежно від питомої потужності нагрітої зони (дивись рисунок 3.1).

7 Знаходять коефіцієнт K_{H1} залежно від тиску середовища поза корпусом блока H_1 (дивись рисунок 3.4).

8 Визначають коефіцієнт K_{H2} залежно від тиску середовища усередині корпусу блока H_2 (дивись рисунок 3.5).

9 Визначають перегрів корпусу за рівнянням

$$\mathcal{G}_K = \mathcal{G}_1 K_{H1}. \quad (3.12)$$

10 Розраховують перегрів нагрітої зони за залежністю

$$\mathcal{G}_3 = \mathcal{G}_K + (\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_1) K_{H2}. \quad (3.13)$$

11 Визначають середній перегрів повітря в блоці за формулою

$$\mathcal{G}_B = 0,5(\mathcal{G}_K + \mathcal{G}_3). \quad (3.14)$$

12 Знаходять питому потужність елемента за залежністю

$$q_{EЛ} = \frac{P_{EЛ}}{S_{EЛ}}, \quad (3.15)$$

де $P_{EЛ}$ – потужність, що розсіюється елементом (вузлом), температуру якого потрібно визначити;

$S_{EЛ}$ – площа поверхні елемента (разом з радіатором), омивана повітрям.

13 Розраховують перегрів поверхні елемента за формулою (3.11).

14 Розраховують перегрів середовища навколо елемента за залежністю

$$\mathcal{G}_{EЛC} = \mathcal{G}_B \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{EЛ}}{q_3} \right). \quad (3.16)$$

15 Визначають температуру корпусу блока за виразом

$$T_K = \mathcal{G}_K + T_C, \quad (3.17)$$

де T_C – температура середовища навколо блока.

16 Визначають температуру нагрітої зони за залежністю

$$T_3 = \mathcal{G}_3 + T_C. \quad (3.18)$$

17 Знаходять температуру поверхні елемента за виразом

$$T_{EЛ} = \mathcal{G}_{EЛ} + T_C. \quad (3.19)$$

18 Знаходять середню температуру повітря в блоці за залежністю

$$T_B = \mathcal{G}_B + T_C. \quad (3.20)$$

19 Обчислюють температуру середовища навколо елемента за виразом

$$T_{ELC} = \vartheta_{ELC} + T_C. \quad (3.21)$$

Зараз при конструюванні використовуються такі методи [4]:

- геометричний – для виробів, що виготовляються в масовому виробництві і які побудовані на взаємозамінних деталях;

- машинобудівний – при проектуванні несучих конструкцій ЕА всіх рівнів, а також усіх видів нерухомих з'єднань (дає можливість забезпечити механічну міцність при мінімальній масі);

- топологічний – при поданні конструктивного вигляду електричної схеми і її топологічних зв'язків (незалежно від її функціонального змісту) для створення друкованого рисунка.

За способом структури зв'язків ЕА розрізняють такі методи проектування конструкцій: базовий, евристичний і автоматизований. Ці методи містять у собі перераховані вище методи конструювання і відображають специфіку конструювання ЕА.

Вибір методу конструювання визначається розв'язуваними задачами, вихідною інформацією і наявними засобами конструювання. Конструювання електричного кола друкованої плати, блока, приладу неможливо без топологічного методу. При цьому схему зв'язків зображують графом, вершини якого відповідають вузлам зв'язку чи елементам схеми, а ребра, що зв'язують вершини між собою, – лініям зв'язку чи провідникам. Цей метод успішно використовують при машинному поділі схеми на модулі, розміщенні елементів на платі, трасуванні з'єднань і розробленні топологічних структур.

На етапі технічного проектування (ТП) метод топологічного конструювання забезпечує скорочення кількості провідників, їхньої довжини, кількості паяних з'єднань, виводів на з'єднувачі, мінімальної кількості шарів, раціонального поділу схеми на

друковані плати і т. д. У той же час він дозволяє врахувати задані конструктивні і технологічні обмеження.

При розробленні конструкції з використанням стандартних і уніфікованих конструкцій здебільшого застосовують геометричний метод. Для вібронапруженої апаратури при розрахунках несучих конструкцій частіше використовують машинобудівний метод.

Визначальним у методах конструювання ЕА є базовий чи модульний підхід. В основу підходу покладено розподіл апаратури на конструктивно і схемно закінчені частини. Причому як базовий підхід, так і його різновиди (функціонально-вузловий, функціонально-модульний і функціонально-блоковий) засновані на принципах агрегування, функціональної і розмірної взаємозамінності, схемної і конструкторської уніфікації. Різновиди базового підходу конструювання пов'язані з різним ступенем уніфікації (функціональних вузлів, модулів, блоків).

У знову розроблюваних виробах ЕА широке застосування знаходить евристичний підхід, у якому використовується узагальнений практичний досвід у галузі конструювання ЕА. На етапі ескізного проектування (ЕП) він застосовується для пошуку нових технічних рішень. Ефективність застосування методу конструювання, різних підходів і методик залежить від ступеня використання ЕОМ.

При автоматизації конструювання найчастіше вирішуються завдання компоновання елементів схеми, трасування електричних з'єднань між елементами, побудування креслень і випуску конструкторської документації.

За ДСТ 23751-86, конструювання такого основного елемента конструкції ЕА, як друкованої плати, може бути здійснено такими способами: ручним, напівавтоматизованим, автоматизованим.

Ручний спосіб конструювання передбачає, що поділ навісних елементів на функціональні групи, розміщення груп елементів на поверхні плати, трасування друкованих провідників (спочатку на одному кресленні, потім перерозподіл по провідних шарах плати) виконуються конструктором. Ручний спосіб

конструювання забезпечує оптимальний розподіл основного рисунка і скорочення кількості вузьких місць.

Напівавтоматизований спосіб конструювання виконує розміщення навісних елементів за допомогою ЕОМ при ручному трасуванні друкованих провідників чи ручний розподіл навісних елементів при автоматизованому трасуванні провідників. Цей спосіб забезпечує прискорення процесу конструювання при оптимальному розміщенні основного рисунка.

Автоматизований спосіб конструювання передбачає кодування вхідних даних, розміщення навісних елементів і трасування друкованих провідників за допомогою ЕОМ. Допускається доопрацювання окремих з'єднань вручну. Цей спосіб забезпечує високу продуктивність праці при виготовленні креслень.

3.4 Порядок розрахунку теплового режиму блока з внутрішнім перемішуванням

1 Розраховують поверхню корпусу блока за формулою (3.6).

2 Розраховують умовну поверхню нагрітої зони за виразом (3.2).

3 Знаходять питому потужність корпусу блока за залежністю (3.5).

4 Знаходять питому потужність нагрітої зони за формулою (3.1).

5 Визначають коефіцієнт ϑ_1 залежно від питомої потужності корпусу блока (дивись рисунок 3.3).

6 Визначають коефіцієнт ϑ_2 залежно від питомої потужності нагрітої зони (дивись рисунок 3.1).

7 Знаходять коефіцієнт K_{H1} залежно від атмосферного тиску поза корпусом блока H_1 (дивись рисунок 3.4).

8 Розраховують об'єм повітря в блоці:

$$V_B = L_1 L_2 L_3 (1 - K_3). \quad (3.22)$$

9 Розраховують середню швидкість перемішування повітря в блоці за виразом (3.7) (при зниженому тиску усередині корпусу блока до виразу (3.7) повинне входити значення продуктивності вентилятора з урахуванням зміни тиску).

10 Визначають коефіцієнт K_w залежно від середньої швидкості перемішування (дивись рисунок 3.7).

11 Визначають перегрів корпусу блока за виразом (3.12).

12 Обчислюють перегрів нагрітої зони за формулою

$$\mathcal{G}_3 = \mathcal{G}_1(K_{H1} - 1) + \mathcal{G}_2 K_w. \quad (3.23)$$

13 Визначають середній перегрів повітря в блоці за виразом

$$\mathcal{G}_B = 0,75\mathcal{G}_3. \quad (3.24)$$

14 Знаходять питому потужність елемента за залежністю (3.15).

15 Розраховують перегрів поверхні елемента за залежністю (3.11).

16 Розраховують перегрів середовища навколо елемента за виразом (3.16).

17 Знаходять температуру корпусу блока за формулою (3.17).

18 Знаходять температуру нагрітої зони, поверхні елемента, середню температуру повітря в блоці і температуру середовища навколо елемента відповідно за формулами (3.18) – (3.21).

3.5 Порядок розрахунку теплового режиму блока в перфорованому корпусі

1 Розраховують поверхню корпусу блока, умовну поверхню нагрітої зони, питому потужність корпусу блока, питому потужність нагрітої зони за формулами (3.6), (3.2), (3.5) і (3.1).

2 Знаходять коефіцієнти ϑ_1 й ϑ_2 залежно від питомої потужності корпусу блока і питомої потужності нагрітої зони (дивись рисунки 3.1 і 3.3).

3 Знаходять коефіцієнти K_{H1} і K_{H2} залежно від тиску поза і усередині корпусу блока – H_1, H_2 (дивись рисунок 3.4 і 3.5).

4 Розраховують площу перфораційних отворів. Для прямокутних отворів (рисунок 3.9, б і в) $S_{\Pi} = n l_1 l_3$, де n – кількість отворів; l_1 – горизонтальний розмір отвору; l_3 – вертикальний розмір отвору. Для круглих отворів (рисунок 3.9, а) $S_{\Pi} = n \pi d^2 / 4$, де d – діаметр отвору.

5 Розраховують коефіцієнт перфорацій за виразом (3.3).

6 Знаходять коефіцієнт K_{Π} залежно від коефіцієнта перфорацій (дивись рисунок 3.2).

7 Визначають перегрів корпусу блока за залежністю

$$\vartheta_K = \vartheta_1 K_{H1} K_{\Pi} \cdot 0,93. \quad (3.25)$$

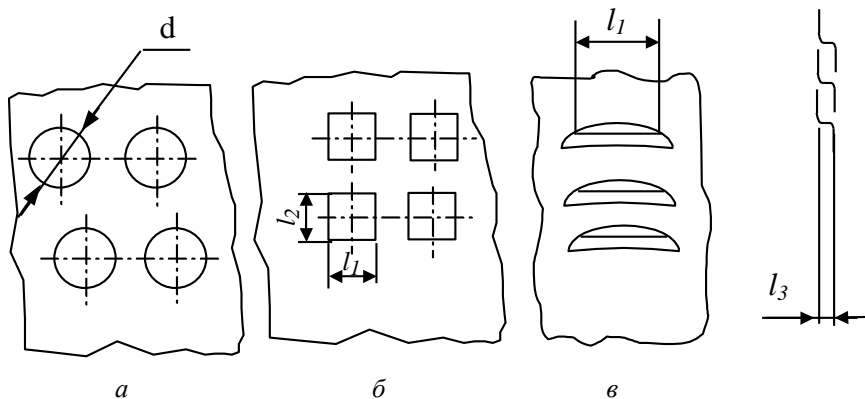


Рисунок 3.9 – Конфігурації перфораційних отворів

8 Визначають перегрів нагрітої зони за формулою

$$\vartheta_3 = 0,93 K_{\Pi} \left[\vartheta_1 K_{H1} + \left(\vartheta_2 \frac{1}{0,93} - \vartheta_1 \right) K_{H2} \right]. \quad (3.26)$$

9 Обчислюють середній перегрів повітря в блоці за залежністю

$$\vartheta_B = \vartheta_3 \cdot 0,6. \quad (3.27)$$

10 Розраховують питому потужність елемента, перегрів поверхні елемента, перегрів середовища навколо елемента за формулами (3.15), (3.11) і (3.16).

11 Знаходять температуру корпусу блока, нагрітої зони, поверхні елемента, повітря в блоці, середовища, що оточує елемент, за виразами (3.17)–(3.21).

Приклад. Визначити тепловий режим блока і його елементів у герметичному корпусі. Потужність, що розсіюється в блоці, $P_6=30$ Вт; потужність, що розсіюється двома елементами: 1) $P_{\text{ЕЛ}}=2,8$ Вт; 2) $P_{\text{ЕЛ}}=2,2$ Вт; горизонтальні розміри корпусу блока: $L_1=0,160$ м, $L_2=0,180$ м; вертикальний розмір корпусу блока $L_3=0,190$ м; площа поверхні елементів: 1) $S_{\text{ЕЛ}}=8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, 2) $S_{\text{ЕЛ}}=118 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; коефіцієнт заповнення $K_3=0,3$; температура навколишнього середовища $T_c=293$ К (+20 °С); тиск навколишнього середовища $H_1=H_2=0,1$ МПа.

Проведемо розрахунок, використовуючи алгоритм.

1 Розраховують поверхню корпусу блока за формулою (3.6):

$$S_K=2[0,160 \cdot 0,180+(0,160+0,180) \cdot 0,190]=0,187 \text{ м}^2.$$

2 Визначають умовну поверхню нагрітої зони за виразом (3.2):

$$S_3=2[0,160 \cdot 0,180+(0,160+0,180) \cdot 0,190 \cdot 0,3]=0,096 \text{ м}^2.$$

3 Визначають питому потужність корпусу блока за формулою (3.5):

$$q_K=30/0,187=160 \text{ Вт/м}^2.$$

4 Розраховують питому потужність нагрітої зони за залежністю (3.1):

$$q_3=30/0,096=312 \text{ Вт/м}^2.$$

5 Знаходять коефіцієнт \mathcal{A}_1 залежно від питомої потужності корпусу блока (дивись рисунок 3.3):

$$\mathcal{A}_1 = 17,5 \text{ К.}$$

6 Знаходять коефіцієнт ϑ_2 залежно від питомої потужності нагрітої зони (дивись рисунок 3.1):

$$\vartheta_2 = 33,0 \text{ К.}$$

7 Обчислюють коефіцієнт K_{H1} , що залежить від атмосферного тиску поза корпусом (дивись рисунок 3.4, а):

$$K_{H1} = 1,0.$$

8 Обчислюють коефіцієнт K_{H2} , що залежить від тиску всередині корпусу блока (дивись рисунок 3.5):

$$K_{H2} = 1,0.$$

9 Визначають перегрів корпусу блока за формулою (3.12):

$$\vartheta_K = 17,5 * 1,0 = 17,5 \text{ К.}$$

10 Розраховують перегрів нагрітої зони за виразом (3.13):

$$\vartheta_3 = 17,5 + (33 - 17,5) * 1,0 = 33 \text{ К.}$$

11 Визначають середній перегрів повітря в блоці за залежністю (3.14):

$$\vartheta_B = 0,5(33 + 17,5) = 25,3 \text{ К.}$$

12 Визначають питому потужність елементів за виразом (3.15):

$$q_{EЛ1} = 2,8 / 8 * 10^{-3} = 350 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{EЛ2} = 2,2 / 118 * 10^{-3} = 18,6 \text{ Вт/м}^2.$$

13 Розраховують перегрів поверхні елементів за формулою (3.11):

$$g_{EЛ1} = 33(0,75+0,25) \frac{350}{312} = 34 \text{ К};$$

$$g_{EЛ2} = 33(0,75+0,25) \frac{18,6}{312} = 25,2 \text{ К}.$$

14 Розраховують перегрів середовища навколо елемента за формулою (3.16):

$$g_{EЛС1} = 25,3(0,75+0,25) \frac{350}{312} = 26,1 \text{ К};$$

$$g_{EЛС2} = 25,3(0,75+0,25) \frac{18,6}{312} = 19,3 \text{ К}.$$

15 Визначають температуру корпусу блока за виразом (3.17):

$$T_K = 17,5 + 293 = 310,5 \text{ К}.$$

16 Визначають температуру нагрітої зони за залежністю (3.18):

$$T_3 = 33 + 293 = 326 \text{ К}.$$

17 Знаходять температуру поверхні елементів за формулою (3.19):

$$T_{EЛ1} = 34 + 293 = 327 \text{ К};$$

$$T_{EЛ2} = 25,2 + 293 = 318,2 \text{ К}.$$

18 Знаходять середню температуру повітря в блоці за залежністю (3.20):

$$T_B = 25,3 + 293 = 318,3 \text{ К}.$$

19 Знаходять температуру середовища навколо елемента за формулою (3.21):

$$T_{EЛС1} = 26,1 + 293 = 319,1 \text{ К};$$

$$T_{EЛС2} = 19,3 + 293 = 312,3 \text{ К}.$$

Порівнюючи отримані значення температур із гранично допустимими, тобто $T_{\text{кдоп}}=T_{\text{ел2доп}}=333 \text{ К}$, $T_{\text{елс1доп}}=343 \text{ К}$, переконуємося, що нормальний тепловий режим для даного блока забезпечується при природній конвекції.

4 ПРОЕКТУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ І ВУЗЛІВ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ І ЕЛЕКТРИЧНОГО МОНТАЖУ

4.1 Особливості розроблення елементів несучої конструкції

Несучою конструкцією в ЕА називають комплекс взаємозалежних механічних деталей і вузлів, що несуть на собі всі схемні елементи, несучі деталі й електричний монтаж. Основними вузлами несучої конструкції в ЕА є корпуси приладів – стійки, апаратні шафи, каркаси, контейнери, шасі і панелі блоків і вузлів. До несучої конструкції належать також підкладки, друковані плати, основи, рами, кронштейни, напрямні, обмежники та ін.

При розробленні несучої конструкції ЕА первинними вимогами є: механічна міцність, жорсткість і довговічність; надійність механічних з'єднань; багатофункціональність деталей і вузлів; ефективність використання конструкційних матеріалів. Питома вага кожної з цих вимог у загальному обсязі залежить від призначення вузла і деталі, сфери використання й умов експлуатації.

Несуча конструкція ЕА може вважатися розробленою з оптимальними характеристиками лише в тому випадку, якщо її функції виконуються з високою якістю, а властиві їй параметри і форма відповідають мінімальній матеріалоемності. У такій конструкції, по-перше, повинні бути враховані величини і напрямки дії всіх статичних і динамічних навантажень, по-друге, розумною мірою використані пружні властивості матеріалу.

У процесі розроблення деталей і вузлів основними питаннями є конструктивно-технічні: виготовлення і збирання в

умовах автоматизованого виробництва; точність виготовлення; забезпечення заздалегідь заданого розташування елементів схеми; взаємозамінність елементів конструкції; скорочення номенклатури деталей, марок матеріалів і обробок; суміщення ряду конструктивних функцій в одній деталі; забезпечення самоустановлюваності деталей простими опорними площинами при обробці і збиранні; багаторазове використання в одному виробі однакових вузлів і деталей; надійне з'єднання деталей, виготовлених з різнорідних матеріалів, і замінність частин, що зношуються. Усе це повинно бути виконано на базі простої і однорідної технології обробки з мінімальними відходами матеріалів.

Іншим не менш важливим фактором є вибір запасу міцності. Прийнятий запас міцності має бути рівнозначним для всіх ланок механічного ланцюга. Якщо міцність усього ланцюга визначається міцністю його слабкої частини, то скільки б ми не підсилювали інші частини, загальна міцність ланцюга не підвищиться.

Відомо, що при згині і крученні напруги по перерізу розподіляються від нуля (у нейтральному шарі) до максимуму (у крайніх шарах). У цьому випадку видалення металу в місцях найменших напруг утворить пустотілий профіль, що дорівнює за міцністю суцільному стрижню. Прагнення до більш ефективного використання металу змушує конструкторів застосовувати профілі різної конфігурації при розробленні деталей і вузлів несучої конструкції.

4.2 Жорсткість елементів конструкції

Ступінь жорсткості в ЕА оцінюється деформацією конструкції при впливі зовнішніх сил. До зовнішніх сил головним чином відносять динамічні сили, що діють у результаті зміни швидкості, вібрацію й удари.

Жорсткість системи залежить від характеру прикладення навантаження і способу кріплення елементів. Так, наприклад, брус, що вільно лежить на двох опорах і навантажений

рівномірно розподіленим навантаженням, має жорсткість у 1,5 разу більшу, ніж брус тієї самої довжини, навантажений зосередженим навантаженням, і в 4-8 разів меншу від жорсткості брусів із закріпленими кінцями.

Ступінь жорсткості характеризується коефіцієнтом жорсткості, що для бруса постійного перерізу при роботі на згин дорівнює

$$\lambda_{зг} = P/\delta = KEJ/l_б^3, \quad (4.1)$$

при роботі на кручення

$$\lambda_{кр} = M/\varphi = GJ_p/l_б, \quad (4.2)$$

а при роботі на розтяг–стиск

$$\lambda_p = P/\delta = ES_б/l_б, \quad (4.3)$$

де J – момент інерції перерізу бруса;

E – модуль нормальної пружності матеріалу;

P – діюча сила;

δ – прогин (деформація);

M – крутний момент;

J_p – полярний момент інерції перерізу бруса;

$l_б$ – довжина бруса;

K – коефіцієнт, що залежить від умов навантаження;

$S_б$ – площа перерізу бруса;

G – модуль зсуву;

φ – кут закручування (деформація).

Відомо, що загальна маса радіоелектронного збирання m знаходиться в прямій залежності від типу і кількості схемних елементів, що входили в неї. При максимальній ефективності використання конструкційних матеріалів ці елементи в кінцевому рахунку і визначають необхідні міцнісні параметри несучої конструкції.

4.2.1. Залежність деформації від характеру навантаження

З наведених співвідношень (4.1)–(4.3) можуть бути отримані вирази деформації для випадків:

1) розтяг або стиск

$$\delta_p = Pl_6 / ES_6; \quad (4.4)$$

2) згин

$$\delta_{зг} = Pl_6^3 / KEJ; \quad (4.5)$$

3) кручення

$$\varphi = Pl_1 l_6 / GJ_p, \quad (4.6)$$

де l_1 – довжина плеча прикладення сили, що скручує брус.

Припустимо, що на кожний із двох однакових брусів діють сили. Одна з них викликає розтяг, а інша – згин. Прирівнюючи вирази (4.4) і (4.5) і підставляючи значення $J = a_6^3 b_6 / 12$, $S_6 = a_6 b_6$ (при консольно закріпленому стрижні $K=3$) при $a_6 = l_6$, знайдемо $\delta_p = \delta_{зг} / 4$.

Як видно, за тих самих умов навантаження згин супроводжується значно більшою деформацією, ніж розтяг або стиск. Іншими словами, при однаковій деформації матеріалу, що працює на стиск (розтяг), витрачається в кілька разів менше, ніж матеріалу, що працює на згин.

4.2.2 Залежність деформації від маси і характеру матеріалу

В ЕА, що працює при значних прискореннях, власна маса виявляється тісно зв'язаною з динамічним впливом. Чим менше маса несучої конструкції при збереженні її міцнісних параметрів, тим меншого впливу динамічних перевантажень вона зазнає. Тому при конструюванні несучої конструкції ЕА необхідно

насамперед оцінити можливість використання більш легкого матеріалу при збереженні умов міцності і жорсткості.

Підставою для подібної оцінки можуть служити кількісні вирази деформації розтягу, стиску, згину або кручення. Аналізуючи їх, можна помітити, що максимальні деформації пропорційні відношенню навантаження до модуля пружності або модуля зсуву і залежать від геометричних розмірів елементів несучої конструкції.

Позначимо об'єм матеріалу $V=a_6b_6l_6$, а відношення маси матеріалу до його об'єму як щільність ρ . Після відповідного перетворення виразу (4.4) одержимо

$$\delta_p = \rho g l_6^2 / E. \quad (4.7)$$

Підставляючи значення моменту інерції $J=a_6^3b_6/12$ у вираз (4.5), будемо мати

$$\delta_{зг} = 12 l_6^4 \rho g / K a_6^2 E, \quad (4.8)$$

і аналогічно попередньому з виразу (4.6)

$$\varphi = 12 l_1 l_6^2 \rho g / a_6^2 G. \quad (4.9)$$

Звідси видно, що відношення P/E виражає фізичні властивості матеріалу, а l_6/a_6 – розмірні властивості конструкції. Якщо відношення P/E буде малим, то при тих самих розмірах тіла деформація його від власної ваги буде меншою. Значення E/ρ для матеріалів, найчастіше використовуваних в елементах несучої конструкції, наведено в таблиці 4.1. У таблиці 4.2 наведено фізико-хімічні властивості конструкційних матеріалів. Існують різні способи збільшення жорсткості елементів конструкції, наприклад згин прагнуть замінити розтягом (стиском) чи роблять блокування деформації за допомогою косих зв'язків. Жорсткість можна збільшити створенням спеціального профілю в балок чи гнуттям листового прокату. Ефективним засобом збільшення жорсткості системи є використання балок із симетричними

профілями (на відміну від несиметричних). Навантаження несиметричних профілів викликає появу додаткового крутного моменту, у той час як навантаження балки з симетричним профілем – ні.

Таблиця 4.1 – Оцінка матеріалу за значенням відношення модуля пружності E до щільності ρ

Найменування матеріалу	$E, 10^7 \text{ Н/м}^2$	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	$E/\rho, 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$
Нікель	21000-23000	8,8	2400
Сталь	21000	7,8	2700
Алюмінієвий сплав	7200	2,8	2600
Магнієвий сплав	4000	1,7	2270
Латунь	10000	8,4	1200
Бронза	11400	8,5	1360
Титан	11500	4,5	2600
Кераміка	8000	3,8	2100
Ситал	10000	2,6	3800
Пластмаси термореактивні	60-10000	1,3-1,8	44-800
Пластмаси термопластичні	10-100	1,2-1,5	8,5-85

Таблиця 4.2 – Фізико-хімічні властивості конструкційних матеріалів

Марка сплаву	Модуль пружності $E, 10^7 \text{ Н/м}^2$	Модуль зсуву $G, 10^7 \text{ Н/м}^2$	Границя міцності при розтягу $\sigma_p, 10^7 \text{ Н/м}^2$	Щільність $\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	Коефіцієнт Пуассона
1	2	3	4	5	6
АД, АД1	7100	2700	8-14	2,71	0,30
АМц	7100	2700	11-22	2,73	0,30
АМг	7000	2700	18-27	2,67	0,30
Д1, Д1П	7100	2700	21-42	2,80	0,31
Д16, Д16П	7100	2700	18-48	2,80	0,33
В95	7100	2700	22-55	2,80	0,33
АЛ8	7200	2700	28,0	2,80	0,31
АЛ16В	7200	2700	16,0	2,80	0,31
МЛ2	4200	1480	12,0	1,70	0,33
МО, М1, М4	11500	4240	30,0	8,94	0,34

Бр.ОФ 6,5-0,4	11200	4200	35-80	9,0	0,35
Бр.ОЦС 4-4-2,5	7500	4200	30-65	8,4	0,35
Бр.Б2	11700	4200	50-140	8,2	0,35
Л70	10500	-	32-66	8,53	0,3
Л80	10500	-	32-64	8,65	0,3

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6
Л90	11000	-	26-48	8,8	0,3
Л Мц58-2	10000	-	40-70	8,5	0,3
ЛС59-1	10500	-	40-65	8,5	0,3
79НМ	21000	-	530-1060	8,6	-
45Н	20000	-	1700	8,2	-
50НП	20000	-	1250-1900	8,2	-

Немагнітні конструкційні матеріали з магнітною проникністю в сильних магнітних полях (не вище 1,05-1,5) широко застосовуються в різних галузях електромашино- і приладобудування. Ці матеріали повинні мати високі механічні властивості. З них виготовляють болти, що стягують сильно навантажені осердя трансформаторів, розподільні щити, коробки; деталі потужних генераторів; корпуси приладів стійки обчислювальних машин і т. д. До немагнітних сталей належать хромонікелеві сплави ОХ18Н10Т, 12Х18Н12Т та ОХ14Н15М2. Сталь 4Х12Н8М8МФБ придатна для зварювання і є немагнітною і жаростійкою.

4.3 Конструкція електричного монтажу

Конструкція електричного монтажу багато в чому визначається елементною базою, діапазоном частот, структурним рівнем збирання й умовами експлуатації. В ЕА використовують два способи електромонтажу: об'ємний (проводи, джгути, кабелі) і плоский (друкований монтаж). Широка уніфікація схемних елементів і електромонтажних виробів, використовуваних в ЕА, сприяє створенню типових конструкцій електромонтажних вузлів, що забезпечують високий рівень стандартизації й однаковості технологічного процесу виготовлення.

Ретельно обміркований електромонтаж має високу надійність і електромагнітну сумісність, забезпечує стійкість роботи апаратури і сприяє швидкому виявленню несправностей і їхньому усуненню. Складність зв'язків і довжина кіл вузлового блокового чи міжблокового електромонтажу значною мірою залежать від компонування елементів і вузлів ЕА.

Основними конструктивними елементами електромонтажу є:

- елементи екранування і заземлення;
- проводи, кабелі і монтажні матеріали;
- елементи кріплення проводів, джгутів і кабелів;
- з'єднувальні елементи електричного монтажу;
- одношаровий і багатшаровий друкований монтаж;
- монтажні з'єднання приладів, блоків і вузлів ЕА.

На конструкцію електромонтажу найбільший вплив має частотний діапазон роботи приладів. У блоках, що працюють на низькій частоті (до 20 Гц), шкідливі зв'язки виникають з появою окремих механічних коливань і особливо на резонансних частотах. Такі коливання можуть бути викликані порушенням жорсткості кріплення елементів магнітних кіл і деяких деталей несучої конструкції. Шкідливі зв'язки різко знижуються, коли найбільш чуттєві до механічних коливань перші каскади могутніх підсилювачів, кристалічні резонатори чи електромеханічні фільтри встановлюються на амортизатори (еластичні основи).

Низькочастотні пристрої повинні бути надійно захищені від впливу магнітних полів змінного струму. При монтажі блока широко застосовують монтажні проводи, зв'язані в джгути. Закріплення монтажного проводу здійснюється так, щоб між провідниками і металевими стінками несучої конструкції не виникали індуктивні зв'язки.

У блоках, що працюють на середніх частотах (20 кГц-1 МГц), особливо відчутний зв'язок між вхідними і вихідними електродами транзисторів. У цих випадках керуючі кола кожного каскаду виконують короткими, а самі каскади розташовують послідовно. Елементи схеми кожного каскаду розміщують поблизу "своїх" мікросхеми чи транзистора. Елементи, що створюють магнітні поля, екранують.

Компонування й електромонтаж блоків високої частоти (від 1 до 100 МГц і вище) є більш складною задачею, особливо в апаратурі з великим коефіцієнтом підсилення. У цьому діапазоні дуже відчутним стає вплив ємності елементів електромонтажу й електромагнітного поля. Для досягнення мінімальних випромінювань усередині блоків каскади схеми виконують у вигляді окремих вузлів, ретельно екрануючи їх один від одного і від зовнішніх збудників. Коливальні контури виконують на тороїдальних сердечниках. Екранування часто виконують двошаровими екранами з пермалою і міді.

Щоб уникнути взаємних зв'язків між провідниками, коливальні контури розділяють достатніми проміжками, екрануючи провідники від магнітних полів. Якщо знизити втрати короткими проводами неможливо, то зв'язки виконують коаксіальним кабелем. Чим вище частота, тим сильніше позначаються взаємовпливи ліній зв'язку, тим якісніше повинні виконуватися екранування і заземлення.

Блоки надвисоких частот (від 400 до 3000 МГц) за конструкцією електромонтажу різко відрізняються від ЕА більш низьких частот. Уже при частоті 400...600 МГц втрати настільки зростають, що замість провідників використовують коаксіальні лінії зв'язку, а при частоті більше 1500 МГц – хвилеводи.

4.4 Основні види перешкод і способи їхнього усунення

Перешкоди існують трьох видів: магнітні, електричні і кондуктивні. Причиною виникнення магнітних перешкод є протікання змінного струму в провідниках і котушках індуктивності. Електричні перешкоди виникають за рахунок ємнісних зв'язків при проходженні струму частотою вище 10 МГц. Кондуктивні перешкоди виникають у результаті наявності загальних кіл живлення чи навантаження для основного корисного і навідного шкідливого сигналів.

За наявності шкідливих зв'язків електричних кіл, що знаходяться в магнітних і електричних полях, чи проводового зв'язку кіл живлення і навантажувальних опорів неминуче

знижується стійкість роботи ЕА. Однак зниження таких зв'язків має відбуватися з мінімальними втратами корисного сигналу.

Заходи створення перешкодостійкості ЕА знаходять своє відображення в принципових електричних схемах. Крім того, вони здійснюються і конструктивно: створенням елементів несучих конструкцій, що екранують, і перешкодостійкого електромонтажу.

4.4.1 Екранування магнітних полів

В електричних колах, що знаходяться в змінному магнітному полі, виникає індуктивний зв'язок. Джерелом, що створює змінне магнітне поле, можуть служити трансформатори, дроселі чи котушки індуктивності, що живляться змінним струмом. Зниження впливу магнітних полів у колах ЕА досягається екрануванням.

Екранування магнітних полів здійснюється двома способами. Перший спосіб полягає в шунтуванні магнітного поля суцільним екраном, виготовленим з металу з великою магнітною проникністю. При цьому силові лінії магнітного поля шунтуються стінками екрана, не проникаючи в його внутрішню порожнину. Магнітні екрани використовують і для локалізації магнітних полів розсіювання, що індукуються трансформаторами, дроселями чи котушками індуктивності.

Другий спосіб полягає у використанні ефекту витиснення поля з екрана за рахунок індукції і появи в стінках екрана вихрових струмів. Цей спосіб екранування вигідно використовується при частотах вище 1 МГц. На таких частотах товщина екрана 0,5-1,5 мм уже забезпечує достатнє екранування. На частотах 10 МГц і більше для екранування може бути з успіхом використана мідна чи алюмінієва фольга товщиною 0,03-0,1 мм.

В екранах складної форми не виключена можливість появи різних паразитних зв'язків, передбачити які при розробленні

конструкції дуже важко. Тому конфігурацію екранів варто вибирати найбільш просту, яка легко піддається розрахунку (циліндр, паралелепіпед і ін.).

Габарити екранів визначаються розмірами екранованих котушок і мінімально припустимими втратами від екранування. Екрани виготовляють з металевого тонкошарового немагнітного матеріалу (міді, латуні, алюмінію).

Ослаблення електричного поля відображенням визначається з виразу

$$S_{O.E} = 350 + 10 \lg \frac{640 G_E}{f^3 \mu r^2}, \quad (4.10)$$

де G_E – відносна електропровідність матеріалу екрана (таблиця 4.3);

μ – магнітна проникливість (відносно міді);

r – відстань між джерелом наведення й екраном, мм;

f – частота поля, Гц.

З метою збереження ефективності екранування вхідні і вихідні проводи котушки індуктивності також повинні бути екранованими.

Таблиця 4.3 – Електрична провідність і магнітна проникливість матеріалів, застосовуваних для екранів

Матеріал	Питомий електричний опір $\rho_{ел}$, 10^{-8} Ом·м	Відносна електропровідність G_e	Магнітна проникність μ
1	2	3	4
Мідь	1,72	1	1
Алюміній	2,83	0,61	1
Цинк	5,9	0,292	1
Нікель	7,8	0,246	110–600
Латунь	7,5	0,25	1
Бронза оловя'но-фосфорна	11,5	0,15	1

Олово	11,5	0,15	1
Пермалой	21	0,082	6000–100000
МЮ-метал	25	0,069	7000–100000
Сталь малої кременистості	16	0,107	170–8400
Сталь середньої кременистості	25	0,069	250–7700
Сталь високої кременистості	34	0,051	450–7800
Чавун	90	0,019	620

Матеріали для екранування вибирають виходячи з умов міцності екранів і їхньої стійкості до корозії. Найбільш широко використовуються сталь, мідь, латунь і алюміній у вигляді тонколистового прокату: сітки і фольги. Ці самі метали використовуються і для металізації поверхні. Переважно застосовують такі групи сплавів з високою магнітною проникністю:

- 1) 79НМ, 80НХС, 76НХД, 80НМ;
- 2) 50НХС, 38НС;
- 3) 45Н, 50Н, 33НКМС;
- 4) 50НП, 65НП, 68НМП, 40НКМН;
- 5) 79НМ, 77НМД, 80НГМ.

Ці сплави застосовуються для виготовлення магнітних екранів, сердечників малогабаритних трансформаторів, дроселів, реле, що працюють у слабких полях, головок апаратури звукозапису. При товщині стрічки 0,05 мм і менше – для сердечників імпульсних трансформаторів, магнітних підсилювачів, елементів обчислювальної техніки чи інших безконтактних магнітних елементів.

З виразу (4.10) видно, що при збільшенні частоти ефективність екранів зростає. Однак магнітні матеріали (сталь, пермалой та ін.) при тій самій товщині екрана, що і немагнітні (мідь, алюміній та ін.), при низькій частоті використовуються більш вигідно.

Коли зниження паразитних зв'язків стає однією з основних умов надійної роботи систем, виникає необхідність у розробленні, крім окремих екранів суцільного екранування, несучих конструкцій: шасі блоків, корпусів приладів, приладових стійок, шаф і контейнерів. З метою створення в них електрогерметичності роблять екранування місць рознімань кришок, дверей, оглядових вікон і прорізів, а також заземлення елементів несучої конструкції й електромонтажних кіл.

4.4.2 Екранування провідників

Електромонтажні проводи, як і елементи змінного струму (трансформатори, дроселі і т. д.), самі є джерелами чи приймачами перешкод. Як відомо, змінні струми, проходячи по провідниках, створюють навколо них електричні і магнітні поля. Останні можуть створювати наведення в колах, розташованих у безпосередній близькості від них.

Для захисту чутливих електрокіл від шкідливих наведень використовують екранований кабель і монтажний провід. Металеве обплетення провідників, заземлене на корпус, являє собою захисний екран. По екрану струм наведення протікає в напрямку, зворотному напрямку основного струму, і знижує електричні і магнітні поля, створювані основним струмом.

При низькій частоті якість екранування металевим обплетенням зберігається лише в тому випадку, коли це обплетення буде служити єдиним провідником зворотного струму. У випадку короткого замикання частини обплетення екранування цієї ділянки порушується.

У колах змінного струму замість екранованого проводу застосовують звичайний двупарний провід. У кожен момент струми в ньому протікають у протилежних напрямках, створюючи навколо різнойменні, взаємовинищувальні поля.

4.4.3 Екранування електричних полів

Як відомо, завдяки наявності електричного поля між двома точками (джерелом змінної напруги і приймачем перешкод) буде спостерігатися ємнісний зв'язок. Для зниження цього зв'язку між двома точками досить установити екран, надійно з'єднаний із загальним корпусом. Екран являє собою перегородку з тонкого листового металу з гарною електропровідністю. При цьому ємність на корпусі збільшується, а напруга поля, що створило перешкоди, різко знижується.

5 МІЦНІСНИЙ І ВІБРАЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Найбільш відповідальним елементом електронного пристрою є друкований вузол, основною несучою конструкцією якого є друкована плата (ДП). Розрахунок ДП на міцність зводиться до визначення товщини, при якій була б забезпечена необхідна жорсткість і міцність конструкції.

Розрахунок проводиться у два етапи.

На першому етапі відомі габаритні розміри ДП (ширина і довжина) і маса навісних елементів, розміщених на ДП. Конструктор вибирає матеріал основи ДП і за таблицею 2.5 визначає його фізико-хімічні властивості. Припустимо, що обрано склотекстоліт СТЭФ-2-35, для якого щільність $\rho = 1,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, модуль пружності $E = 2,95 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ і руйнівне напруження при згині впоперек листа $[\sigma_{изг}] = 340 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

Габаритні розміри ДП (ширина b і довжина l) були отримані в результаті виконання розміщення навісних елементів і

трасування електричних з'єднань відповідно до електричної принципової схеми пристрою (ДСТ 10317-79).

Для прикладу прийmemo $l=0,15$ м; $b=0,1$ м; маса навісних елементів $m_{ел} = 50 \cdot 10^{-3}$ кг.

Основною формулою для розрахунку на міцність є вираз (2.1). Максимальний згинальний момент M_{max} розраховується за формулою відповідного ескізу балки, що вибирається виходячи зі способу закріплення друкованого вузла в пристрої і розташування навісних елементів на платі (таблиця 2.12). Звичайно навісні елементи розташовуються рівномірно по всій поверхні ДП, що відповідає розподіленому навантаженню. У багатьох пристроях друковані вузли закріплюються в етажеркову конструкцію. При цьому механічне кріплення їх виконується за допомогою гвинтів і гайок по кутах ДП. Такому закріпленню відповідає еквівалентна схема балки з обпертими кінцями.

У цьому випадку максимальний згинальний момент розраховується за формулою

$$M_{max} = \frac{Pl}{8},$$

а прогин плати

$$\sigma_{max} = \frac{5Pl^3}{384EJ}.$$

Сила P визначається як $P = m_{ел} \cdot \sum \dot{V}$,

де $\sum \dot{V} = \dot{V}_{лін} + \dot{V}_{вібр} + \dot{V}_{удар}$ є сумою лінійних, вібраційних і ударних прискорень, що діють на електронний пристрій, установлений на рухомому об'єкті. Якщо об'єкт стаціонарний, то

$$\sum \dot{V} = g.$$

Оскільки ДП має прямокутний переріз, то для обчислювання моменту інерції J і моменту опору W використовуються такі формули (таблиця 2.13):

$$J = \frac{bh^3}{12}; \quad W = \frac{bh^2}{6},$$

де h – товщина основи ДП.

Розв'язання:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma_{32}];$$

$$[\sigma_{32}] = \frac{6PL}{8 \cdot bh^2};$$

$$h \geq \sqrt{\frac{3PL}{4b[\sigma_{32}]}};$$

$$h \geq \sqrt{\frac{3 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 0,15}{4 \cdot 0,1 \cdot 340 \cdot 10^6}};$$

$$h \geq 0,04 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Отримане значення h є основним для визначення товщини основи ДП. Остаточне значення h можна визначити на підставі таких умов:

- не був врахований коефіцієнт запасу міцності; для стаціонарної апаратури і при лінійних навантаженнях $k=3$, при вібраційних навантаженнях $k \leq 10$;

- при визначенні сили P була врахована тільки маса навісних елементів $m_{\text{ел}}$ і не враховувалася маса самої основи ДП, що звичайно порівнянна з $m_{\text{ел}}$;

- товщина основи ДП може бути обрана тільки зі стандартного ряду значень для жорстких плат 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм.

На підставі вищесказаного вибираємо $h = 1,0 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Другий етап розрахунку ДП на міцність полягає в перевірці ДП на згин за припустимим прогином, що вибирається рівним 2 % меншої сторони основи ДП: $[\delta] = 2\%b$. На цьому етапі при

розрахунку навантаження Р на ДП враховується і маса навісних елементів і маса ДП:

$$m_{III} = \rho \cdot l \cdot b \cdot h;$$

$$m_{III} = 1,85 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 0,1 \cdot 0,001 = 27,75 \cdot 10^{-3} \text{ кг} .$$

Прогин основи ДП дорівнює:

$$\sigma = \frac{5 \cdot 27,75 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 0,15^3 \cdot 12}{384 \cdot 2,95 \cdot 10^{10} \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 0,0486 \cdot 10^{-3} \text{ м} ;$$

$$[\delta] = 2\% \cdot 0,1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м} ;$$

$$0,0486 \cdot 10^{-3} < 2 \cdot 10^{-3} \text{ м} .$$

Таким чином, обрана товщина основи ДП цілком задовольняє міцнісні вимоги.

Вібраційний розрахунок друкованого вузла полягає у визначенні частоти власних коливань і виборі амортизаторів, що повинні застосовуватися при установленні електронного пристрою на рухомому об'єкті.

Частота власних коливань друкованого вузла визначається за формулою

$$f_{ПУ} = k_B \cdot k_M \frac{Ch}{l^2} 10^2 ,$$

де С – частотна постійна сталеві пластини (таблиця 2.14);

h, l – товщина і довжина основи ДП;

k_М – коефіцієнт, що враховує матеріал основи ДП,

$$k_M = \sqrt{\frac{E\rho_c}{E_c\rho}} ;$$

E, ρ – модуль пружності і щільність матеріалу основи плати;

E_c, ρ_c – модуль пружності і щільність сталі, $E_c=2 \cdot 10^{11}$ Па,
 $\rho_c=7,8 \cdot 10^3$ кг/м³;

k_B – коефіцієнт, що враховує масу елементів на платі,

$$k_M = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_{EL}}{m_{ПП}}}};$$

$m_{ПП}$ – маса основи ДП, $m_{ПП}=27,75 \cdot 10^{-3}$ кг.

Для визначення частотної постійної C необхідно вибрати еквівалентну схему закріплення пластини (рисунок 2.1) залежно від способу закріплення друкованого вузла в блоці електронного пристрою. Якщо використовується етажеркова конструкція з закріпленням у чотирьох точках по кутах, то такому закріпленню відповідає еквівалентна схема 10 (рисунок 2.1). Крім того, необхідно знайти співвідношення l/b для ДП, що розраховується.

Для розглянутого прикладу

$$\frac{l}{b} = \frac{0,15}{0,10} = 1,5.$$

За таблицю 2.14 вибираємо $C=51$.

Якщо розраховане відношення сторін l/b не збігається з наведеними значеннями в таблиці 2.14, то значення C знаходять екстраполяцією.

Частота власних коливань друкованого вузла

$$f_{ПВ} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{27,75 \cdot 10^{-3}}}} \cdot \sqrt{\frac{2,95 \cdot 10^{10} \cdot 7,8 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{11} \cdot 1,85 \cdot 10^3} \cdot \frac{51 \cdot 0,001}{0,15^2} \cdot 10^2} = 84 \text{ Гц}.$$

Якщо в електронному пристрої друковані вузли зібрані в блок, то частота власних коливань блока визначається за формулою

$$\frac{1}{f_{\Sigma}^2} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_{\Pi V i}^2},$$

де n – кількість друкованих вузлів у блоці.

Розрахована частота власних коливань друкованого вузла чи блока дозволяє оцінити необхідність установлення приладу на амортизаторах, якщо прилад повинний використовуватися на об'єктах, що рухаються.

Припустимо, що на об'єкті діє вібраційне прискорення $\dot{V}_v = 5g$ в діапазоні частот вібрації $f_B = 10-200$ Гц. Якщо електронний прилад містить один блок, який складається з двох друкованих вузлів, то частота блока $f_{\Sigma} = \frac{f_{\Pi V}}{\sqrt{2}} = 59,4$ Гц.

Тоді при вібрації з частотою $f_B = 59,4$ Гц виникає резонанс, що може призвести до руйнування друкованого вузла. Щоб уникнути цього, прилад необхідно установити на амортизатори.

Нехай маса приладу $m_{\Pi P} = 0,32$ кг і він буде встановлений на чотирьох амортизаторах, розташованих симетрично відносно центра мас приладу. Навантаження на один амортизатор

$$P = \frac{m_{\Pi P} \cdot g}{4} = \frac{0,3 \cdot 9,8}{4} = 0,735 \text{ Н}.$$

Амплітуда вібрації на резонансній частоті $f_{\Pi V}$

$$A_B = \frac{\dot{V}_B}{(2\pi f_{\Pi V})^2} = \frac{5 \cdot 9,8}{(2\pi \cdot 59,4)^2} = 0,352 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

За роботою [3] вибираємо амортизатор АП-2-8-3.6 з номінальним навантаженням 36 Н, що забезпечує гасіння вібрації при амплітудах $A_B < 0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Коефіцієнт жорсткості амортизатора в напрямку осі Z $C_Z = 22500$ Н/м.

Система амортизації вважається задовільною, якщо на резонансній частоті $f_{\Pi V}$ (чи f_{Σ}) вона гасить не менше 95 % амплітуди вібрації. Для оцінки системи амортизації проводимо динамічний розрахунок.

Визначаємо частоту власних коливань системи амортизації (приладу, встановленого на амортизаторах):

$$f_{zc} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n C_{zi}}{m_{PP}}},$$

де n – кількість амортизаторів, $n=4$.

$$f_{zc} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4 \cdot 22500}{0,32}} = 84,45 \text{ Гц.}$$

Оскільки амортизатор без демпфірування, то коефіцієнт динамічної сприйнятливості

$$\lambda = \frac{1}{1 - q^2},$$

де $q = \frac{f_{пУ}}{f_{zc}}$.

$$\lambda = \frac{1}{1 - \left(\frac{59,4}{84,45}\right)^2} = -1,979.$$

Тоді

$$\chi = |1 - |\lambda|| \cdot 100\% \geq 95\%,$$

$$\chi = |1 - |-1,979|| \cdot 100\% = 97,9\%.$$

Таким чином, вибраний амортизатор повністю забезпечує захист пристрою від вібрації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Мірошник М.А. Конспект лекцій з дисциплін «САПР пристроїв та систем автоматики» та «Основи систем автоматизації проектування». – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – 85 с.

2 Паэрэнд Ю.Э. Основы конструирования и надежность электронных устройств: Учеб. пособие. – Алчевск: ДГТУ, 2008. – 155 с.

3 Автоматизированное проектирование систем автоматического управления: Учеб. пособие. – М.: Факультет Информатики и Радиоэлектроники, 2007. – 83 с.

4 Бережна М.А. Комп'ютерні технології автоматизованого виробництва: Навч. посібник. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2007. – 368 с.

5 Удосконалення організаційно-управлінської роботи на підприємствах залізничного транспорту в сучасних умовах: Навч. посібник / В.М. Бутенко, О.Г. Дейнека, А.О. Каграманян та ін. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – 216 с.

6 Болдин А.Н., Задиранов А.Н. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. пособие. – М.: МГИУ, 2006. – 104 с.

7 Чуриков А.А. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: метод. указания / А.А. Чуриков, Г.В. Шишкина, Л.Л. Антонова. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2005. – 40 с.

8 Павлов Е.П., Санникова И.Т. Основы проектирования электронных средств: Конспект лекций. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. – 342 с.

9 Ли К. Основы САПР (CAD, CAM, CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.

10 Резевиг В.Д. Система P-CAD 2001. – М.: Изд-во «СОЛОН-Р», 2003. – 557 с.

11 Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учебник. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 180 с.

12 Лопаткин А.В. Проектирование печатных плат в системе P-CAD 2001: Учеб. пособие для практ. занятий. – Нижний Новгород: НГТУ, 2002. – 190 с.

13 Уваров А. P-CAD 2000, ACCEL EDA. Конструирование печатных плат: Учеб. курс. – СПб.: Питер, 2001.- 320 с.

14 Стешенко В.Б. ACCEL EDA. Технология проектирования печатных плат. – М.: «Нолидж», 2000.-512 с.

