

Р.С. Лободзінська, О.А. Костюк, О.І. Нікольський, О.П.Шеремета

**КОНСТРУЮВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Р.С. Лободзінська, О.А. Костюк, О.І. Нікольський, О.П.Шеремета

КОНСТРУЮВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів приладобудівного профілю. Протокол № 9 від 23 березня 2006р.

Вінниця ВНТУ 2007

УДК 621 382 (075.8)
К 65

Рецензенти:

В.М. Кичак, доктор технічних наук професор
С.М. Злепко, доктор технічних наук професор
В.О. Грабчак, кандидат технічних наук доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Лободзінська Р.Ф., Костюк О.А., Нікольський О.І., Шеремета О.П.
К65 **Конструювання і технологія радіоелектронних засобів.**
Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 90 с.

В посібнику розглянуті основні теоретичні та практичні питання проектування радіоелектронних вузлів, друкованих плат та деталей конструкції. Посібник призначений для вивчення теоретичного матеріалу, виконання лабораторних робіт та дипломних проектів студентами вищих та середніх спеціальних навчальних закладів спеціальностей “Радіотехніка”, “Апаратура радіозв’язку радіомовлення та телебачення”.

УДК 621 382 (075.8)

Зміст

ПЕРЕДМОВА	5
ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ	6
1 ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНСТРУЮВАННЯ РЕЗ	7
1.2 Технічні вимоги до конструкції	9
1.2.1 Вимоги до показників призначення РЕА	9
1.2.2 Вимоги до стійкості РЕА при дії механічних та кліматичних факторів	9
1.2.3 Вимоги до надійності РЕА	12
1.2.4 Вимоги до ергономіки та естетики	16
1.2.5 Вимоги до технологічності та уніфікації	17
1.2.6 Патентно-правові вимоги	18
1.2.7 Вимоги безпеки РЕА	18
1.3 Технічне завдання на проектування	20
1.3.1 Технічне завдання для дослідно-конструкторських робіт	20
1.3.2 Технічне завдання на проведення науково-дослідної роботи	23
2 КОНСТРУКТОРСЬКА ДОКУМЕНТАЦІЯ	25
2.1 Види конструкторських документів	25
2.2 Схемна документація на радіоелектронні засоби	27
2.2.1 Класифікація та позначення схем	27
2.2.2 Умовне графічне та літерне позначення елементів	27
2.2.3 Спрощення у схемах	28
2.2.4 Оформлення переліку елементів	28
3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ	30
3.1 Основні терміни та визначення	30
3.2 Кількісні характеристики надійності та їх властивості	30
3.3 Розрахунок надійності не ремонтпридатних систем за раптовими відмовами	33
4 КОНСТРУКТИВНА ІЄРАРХІЯ ЕЛЕМЕНТІВ, ВУЗЛІВ ТА ПРИСТРОЇВ	38
4.1 Класифікація за функціональною складністю	38
4.2 Класифікація за конструктивною складністю	38
5 КОНСТРУЮВАННЯ ВУЗЛА РЕЗ З ДРУКОВАНИМ МОНТАЖЕМ	41
5.1 Вихідні дані для розробки	41
5.2 Особливості електромонтажу радіоелектронної апаратури	41
5.3 Компонування друкованої плати	42
5.3.1 Ручний метод конструювання	42
5.3.2 Напівавтоматизований метод конструювання	44
5.4 Конструювання друкованої плати	44
5.5 Розміщення друкованих провідників на платі	47

5.6 Розрахунок друкованого монтажу	48
5.7 Розрахунок ширини друкованих провідників.....	50
5.8 Особливості конструювання друкованих плат	51
5.9 Розробка конструкторської документації на друковані вузли.....	52
5.9.1 Розробка креслення друкованої плати	52
5.9.2 Розробка складального креслення друкованої плати	55
6 ЗАХИСТ КОНСТРУКЦІЙ РЕА ВІД МЕХАНІЧНИХ ДІЙ.....	58
6.1 Поняття вібростійкості і віброміцності	58
6.2 Розрахунок на дію вібрацій	58
6.3 Розрахунок на дію удару	61
7 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ. МЕТОДИ ЕКРАНУВАННЯ.....	63
7.1 Оцінювання завадостійкості	63
7.2 Розрахунок електромагнітного екранування	67
7.2.1 Розрахунок магнітостатичного екрана.....	68
7.2.2 Розрахунок електростатичного екрана.....	71
7.2.3 Розрахунок електромагнітних екранів у дальній зоні випромінювання	71
7.2.4 Розрахунок електромагнітних екранів у ближній зоні випромінювання.....	72
7.2.5 Розрахунок перфорованих екранів і сіткових екранів.....	72
7.2.6 Багатошарові екрани	73
8 ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ КОНСТРУКЦІЙ РЕА	75
8.1 Загальні положення охолодження радіоелектронної апаратури	75
8.2 Попереднє оцінювання теплового навантаження РЕА.....	76
8.3 Розрахунок охолодження при природній конвекції з герметичним кожухом	77
8.4 Розрахунок природного охолодження з перфорованим кожухом.....	81
Додаток А	85
Додаток Б.....	87
Література	89

ПЕРЕДМОВА

Сучасні радіоелектронні вироби характеризуються суттєвою функціональною, конструктивною та технологічною складністю, що приводить до підвищення вимог до конструкцій. В таких умовах творча роль конструктора в створенні нових виробів помітно зросла. Тому сучасний радіоконструктор повинен володіти відповідним математичним апаратом, розуміти фізичні процеси, які відбуваються в матеріалах та елементах конструкцій, володіти сучасними технологіями, вміти ефективно використовувати програми САПР.

Основна мета курсу – навчити майбутнього інженера, використовуючи знання, отримані при вивченні попередніх дисциплін конструкторського напрямку, створювати нові та модернізувати існуючі конструкції радіоелектронних засобів в цілому та окремих її частин для використання в різних умовах експлуатації, забезпечивши при цьому мініатюризацію та сумісність з об'єктом установлення і оператором.

В процесі конструкторської підготовки студенти повинні навчитися творчо застосовувати на практиці основні стандарти ЄСКД, нормативні документи, довідники з конструювання радіоелектронних засобів, складальних одиниць та деталей, сучасні інженерні методи конструювання радіоелектронних засобів з орієнтуванням на прогресивну технологію та сучасну елементну базу.

Даний навчальний посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальностями “Радіотехніка”, “Апаратура радіозв’язку радіомовлення та телебачення”. В посібнику розглянуті питання електромагнітної сумісності, захисту від механічних впливів, внутрішнє та зовнішнє конструювання зі всіма необхідними розрахунками. Розділи посібника побудовані таким чином, що студенти можуть користуватись ним при вивченні теоретичного курсу, виконанні лабораторних робіт та при самостійній роботі над дисципліною.

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ІМС - інтегральна мікросхема
УГП - умовне графічне позначення
УЛП - умовне літерно-цифрове позначення
ЕРЕ - електрорадіоелементи
ФВ - функціональний вузол
ТЗ - технічне завдання
РЕА - радіоелектронна апаратура
ОК - органи керування
ДП - друкована плата
ОДП – одношарова друкована плата
ДДП двошарова друкована плата
БДП - багатошарова друкована плата
ЕМС - електромагнітна сумісність
КД - конструкторська документація
РЕЗ - радіоелектронні засоби
КП - контактна площадка
ТКС - телекомунікаційні системи

1 ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНСТРУЮВАННЯ РЕЗ

Конструювання є однією із основних частин процесу проектування радіоелектронних засобів, а його мета – фізичне втілення компромісних рішень конструкторського колективу. В створенні РЕЗ беруть участь різні організації, підрозділи, виконавці. Організації діляться на замовника, виконавця, підрядника. РЕА, яка проектується, повинна відповідати світовому рівню, найбільш повно задовольняти вимоги споживачів. Вимоги до конструкції розробляє замовник і вони обумовлюються її призначенням, умовами експлуатації, типом виробництва.

1.1 Стадії проектування радіоелектронних пристроїв

Конструювання проводиться у декілька стадій: науково-дослідна робота (НДР) та дослідно-конструкторська (ДКР). Кожна стадія включає декілька етапів.

Основні етапи проведення НДР (таблиця 1.1):

- передплановий патентний пошук;
- розробка і узгодження із замовником технічного завдання;
- підготовчий етап – вибір напрямків досліджень, розробка, узгодження і затвердження часткового технічного завдання на основні частини НДР;
- основний етап – теоретичні та експериментальні дослідження;
- заключний етап – узагальнення результатів і оцінювання виконаної роботи;
- приймання НДР, узгодження завдання на проведення ДКР.

Етапи проведення ДКР (таблиця 1.2):

- технічне завдання;
- технічна пропозиція;
- ескізний проект;
- технічний проект;
- розробка технічної документації.

Технічне завдання складається виконавцем на основі технічних вимог.

Технічні пропозиції – етап розробки, на якому виконавцем обґрунтовується принципова можливість створення пристроїв із заданими характеристиками і намічаються основні технічні і організаційні рішення.

Ескізний проект – це сукупність конструкторських документів, які вміщують опрацьовані конструкторські рішення, що дають змогу мати уявлення про виріб.

Технічний проект – це сукупність конструкторських документів, які вміщують кінцеві технічні рішення, що дають змогу повного уявлення про виріб і технічні характеристики.

Таблиця 1.1 – Етапи НДР

Етапи НДР	Зміст етапу
Вибір напрямку дослідження	Добір, вивчення та узагальнення науково-технічної документації Розглядання можливих напрямків досліджень та їх оцінювання Вибір напрямку дослідження Обґрунтування прийнятого напрямку Розроблення, погодження та затвердження ТЗ Складання та оформлення проміжного звіту по етапах
Теоретичні та експериментальні дослідження.	Теоретичний пошук, виконання розрахунків, дослідження принципових питань Розроблення документації, виготовлення і налагодження макетів Проведення експериментальних робіт та досліджень Складання висновків за результатами досліджень Складання проміжного звіту
Узагальнення і оцінювання результатів досліджень	Узагальнення результатів теоретичних досліджень і експериментальних робіт Узагальнення матеріалів патентного пошуку і підготовка звіту про патентні дослідження Оформлення патентного захисту Підготовка комплексу звітної документації Формування висновків за результатами досліджень Розглядання результатів НДР на науково-технічній раді Подання роботи до приймання
Прийняття НДР	Приймання і державний облік НДР

Робоча документація – це сукупність конструкторської документації, призначеної для виготовлення і випробування дослідного та серійного зразка.

Таблиця 1.2 – Етапи дослідно-конструкторської роботи

Стадії розроблення	Етапи виконання робіт
1	2
Технічна пропозиція	Добір та узагальнення науково-технічних та патентних документів, підготовка аналітичного огляду

Продовження таблиці 1.2

1	2
	Розроблення технічної пропозиції Розглядання та затвердження технічної пропозиції з наданням документам літери "П"
Ескізний проект	Розроблення комплексу документів ескізного проекту Виготовлення та випробування експериментальних зразків Розглядання та затвердження ескізного проекту з наданням літери "Э"
Технічний проект	Розроблення комплексу документів технічного проекту Розроблення конструкторських рішень виробів та його складових Розглядання та затвердження технічного проекту з наданням літери "Т"
Робоча документація дослідного зразка, призначеного для серійного виробництва.	Розроблення робочої конструкторської документації, призначеної для виготовлення дослідного зразка без надання літери Виготовлення і попередні випробування дослідного зразка Корегування КД за результатами виготовлення дослідного зразка з наданням літери "О" Приймання випробувального дослідного зразка Корегування КД за результатами приймальних випробувань дослідного зразка з наданням літери "О ₁ "

1.2 Технічні вимоги до конструкції

1.2.1 Вимоги до показників призначення РЕА

Ця група вимог встановлює основні технічні характеристики виробу, які визначають її функціональну спрямованість:

- радіотехнічні характеристики функціонального призначення (режими роботи, параметри сигналів, вихідні параметри, індикація);
- експлуатаційні показники (споживана потужність, діапазон частот, смуга пропускання, швидкодія);
- класифікаційні характеристики об'єкта установлення, які визначаються відповідно до таблиці 1.3.

1.2.2 Вимоги до стійкості РЕА при дії механічних та кліматичних факторів

В залежності від місця експлуатації, розрізняють дев'ять основних

кліматичних виконань виробів:

Таблиця 1.3 – Класифікаційна характеристика РЕА

Клас використання	Група використання	Підгрупа використання
Наземна	Стаціонарна	Побутова
		Професійна
	Пересувна	Побутова
		Професійна
	Переносна	Побутова
		Професійна
Морська	Судова	
	Буйкова	
Бортова	Літакова	
	Ракетна	
	Космічна	

- виконання У – для районів з помірним кліматом, який відповідає середньорічному діапазону температури від -45°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
- виконання УХЛ – для районів з помірним і холодним кліматом при середньорічному мінімумі нижче -45°C ;
- виконання ТВ – для районів з вологим тропічним кліматом, при температурі вище $+20^{\circ}\text{C}$ і вологості 80%;
- виконання ТС – для районів з сухим тропічним кліматом і температурою вище $+40^{\circ}\text{C}$;
- виконання М – для районів з помірно холодним морським кліматом (моря, океани, прибережні території), розміщені північніше 30°C північної широти та південніше 30°C південної широти;
- виконання ТМ – для районів з тропічним морським кліматом, розміщених між 30°C північної широти та 30°C південної широти;
- виконання О – загальнокліматичне виконання для суші;
- виконання ОМ - загальнокліматичне морське виконання;
- виконання В – всекліматичне виконання.

Побутову РЕА в залежності від умов експлуатації і категорії розміщення розділяють на такі групи: 1 – апаратура, яка працює в жилих приміщеннях; 2 – автомобільна апаратура, вмонтована в кузов; 3 - переносна апаратура, що працює на відкритому повітрі; 4 - апаратура, що працює на відкритому повітрі, в умовах руху. Такі пристрої мають

витримувати нормативні дії, наведені в таблиці 1.4. Наземну професійну РЕА в залежності від умов експлуатації і категорії розміщення розділяють

Таблиця 1.4 – Норми кліматичних та механічних впливів побутової РЕА

Вид впливу	Норма впливу			
	1-група	2-група	3-група	4-група
Ударна стійкість:				
- прискорення, g	-	10	-	10
- тривалість імпульсу удару, мс	-	16	-	16
- число ударів, не менше	-	20	-	20
Ударна міцність:				
- прискорення, g	-	10	-	-
- тривалість імпульсу удару, мс	-	16	-	-
- число ударів, не менше	-	1000	-	-
Міцність при транспортуванні:				
- прискорення, g	15	-	15	15
- тривалість імпульсу удару, мс	11	11	11	11
- число ударів, не менше	1000	1000	1000	1000
Вібростійкість:				
- прискорення, g	-	2	-	-
- частота, Гц	-	150	-	-
Теплостійкість:				
- робоча температура, °C	40	40	40	40
- гранична температура, °C	55	55	55	55
Вібростійкість:				
- прискорення, g	-	2	-	-
- частота, Гц	-	150	-	-
Атмосферний тиск, кПа	70	70	70	70
Холодостійкість:				
- робоча температура, °C	-	- 10	- 10	- 10
- гранична температура, °C	- 40	- 40	- 40	- 40
Вологостійкість:				
- вологість, %	93	93	93	93
- температура, °C	25	25	25	25

на такі групи: 1 – стаціонарна, яка працює в опалюваних наземних і підземних спорудженнях; 2 – стаціонарна, яка працює на відкритому повітрі або в неопалюваних наземних та підземних спорудженнях; 3 – пересувна, яка встановлена в автомобільному транспорті, що працює на ходу; 4 – пересувна, яка встановлена у внутрішніх приміщеннях річкової судноплавної техніки; 5 – пересувна, яка встановлена на пересувних залізничних об'єктах і працює на ходу; 6 – переносна і портативна,

призначена для довготривалого перенесення на відкритому повітрі; 7 – портативна, призначена для довготривалого перенесення на відкритому повітрі при забезпеченні зовнішніх впливів. Дана апаратура повинна витримувати нормативні впливи, наведені в таблиці 1.5.

Морську РЕА в залежності від умов експлуатації і категорії розміщення розділяють на дві групи: 1 – розміщена у внутрішніх приміщеннях; 2 – розміщена на відкритих палубах.

Дана апаратура повинна витримувати нормативні впливи, наведені в таблиці 1.6.

Для бортової апаратури групи виконання встановлюються за окремими видами впливів (таблиця 1.6). За ударними діями виділяються три групи виконання: 1 - для центральної зони розміщення в літаку; 2 – для кінцевої зони розміщення дозвукових літаків; 3 - для кінцевої зони розміщення звукових літаків.

За тепловими діями класифікують на три групи: 1- пристрої, розміщені у відсіках з регульованою температурою; 2 - пристрої, розміщені у відсіках з нерегульованою температурою; 3- пристрої у відсіках двигуна.

1.2.3 Вимоги до надійності РЕА

Надійність пристроїв характеризується показниками: безвідмовності, збережуваності, ремонтпридатності, довговічності.

Показник безвідмовності характеризує властивість виробу зберігати роботоздатність протягом заданого часу і вміщує ймовірність безвідмовної роботи, середнє напрацювання на відмову, інтенсивність відмов.

Показники довговічності характеризують властивість виробу зберігати роботоздатність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту; вміщує середній термін служби, призначений термін служби, середній ресурс, призначений ресурс.

Показники ремонтпридатності характеризують придатність пристрою до відновлення роботоздатності шляхом проведення технічного обслуговування і ремонтів; вміщує ймовірність відновлення роботоздатного стану, середній час відновлення роботоздатності.

Показники збережуваності характеризують властивість виробу зберігати значення показників безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності під час і після зберігання та транспортування; вміщує середній термін збережуваності, гамма-процентний термін збережуваності.

Основним показником надійності є напрацювання на відмову (таблиця 1.7).

Таблиця 1.5 – Кліматичні і механічні впливи наземної професійної РЕА

Вид зовнішніх факторів	Норми впливів						
	1 група	2 група	3 група	4 група	5 група	6 група	7 група
Вібростійкість:							
- амплітуда віброприскорення, g			0,8 – 3,7 10 - 70	0,25 – 1,1 10 - 30	0,25 – 1,1 10 - 70		0,25 – 1,1 10 - 30
- діапазон частот, Гц	-	-					
Віброміцність:							
- амплітуда віброприскорення, g			1 – 4 10 - 70	1 – 4 10 - 30	1 – 4 10 - 70		1 – 4 10 - 30
- частота вібрації, Гц							
Відсутність резонансу в конструкції:							
- амплітуда віброприскорення, g				0,5 – 0,8 10 - 30			
- частота вібрації, Гц							
Ударна стійкість:							
- тривалість ударного імпульсу, мс	-	-	5 – 10 15	5 – 10 15	5 – 10 15	5 – 10 10	-
- прискорення пікове, g							
- загальне число ударів, не менше		60					
Ударна міцність:							
- тривалість ударного імпульсу, мс	-		15 – 10 15	15 – 10 15	15 – 10 15	15 – 10 10	15 – 10 10
- прискорення, g							
- загальне число ударів, не менше				12000			600
Міцність при транспортуванні:							
- тривалість ударного імпульсу, мс				5 – 10			
- прискорення пікове, g				5, 10, 25			
- число ударів в хвилину				40 – 80			
- загальне число ударів, не менше				13000			

Продовження таблиці 1.5

Вид зовнішніх факторів	Норми впливів						
	1 група	2 група	3 група	4 група	5 група	6 група	7 група
Теплостійкість: - робоча температура, °C - гранична температура, °C	40 55	50 60					40 55
Холодостійкість: - робоча температура, °C - гранична температура, °C	5	- 25	- 40	- 10	- 25	- 10	5
	- 50						
Вологостійкість: - вологість, % - температура, °C	80 25	93 40					80 25
Герметичність при зануренні у воду на глибину, м	-	-	-	-	-	0,5	-
Захист від дії дощу з інтенсивністю, мм/хв	-	-	-	3	-	-	-
Захист від дії морського туману, г/мм ²	2 - 3						
Захист від пилового потоку, м/с	-	10	-	-	10	-	-
Стійкість до пониженого атмосферного тиску, кПа	60						

Таблиця 1.6 – Кліматичні і механічні впливи морської та бортової РЕА

Вид дії	Норма впливу					
	Морська		Бортова			
	Група		Група			Ракетна
	1	2	1	2	3	
1	2	3	4	5	6	7
Відсутність резонансу: - амплітуда, мм - діапазон частот, Гц	0,5 - 0,8 5 - 30		5 - 200			-
Вібростійкість: - прискорення, g - частота, Гц - амплітуда,мм	- 10 2,5	- 30 0,3	5 - 2000			0,5 – 6 1,5-2500 -
Ударна стійкість: - прискорення, g -тривалість імпульсу удару, мс - число ударів, не менше	10 10 – 15 20		6 20 18	8 20 18	12 20 18	-
Ударна міцність: - прискорення, g - тривалість імпульсу удару, мс - число ударів, не менше	10 10 – 15 10 ³		4 – 6 20 7 ³	6 – 8 20 7 ³	8 – 12 5 – 15 7 ³	-
Тиск знижений та розгерметизація: - тиск зовнішнього середовища, мм рт. ст - відносне зниження електричної міцності повітряних проміжків.	- -		350 0,6	200 0,35	90 0,1	0-760
Теплостійкість: - робоча температура, °С - гранична температура, °С	50 65		60 65	60 85	60 85	125- 315

Продовження таблиці 1.6

1	2	3	4	5	6	7
Холодостійкість: - робоча температура, °С - гранична температура, °С	- 10 - 55	- 40 - 55	- 60		-	-
Вологостійкість: - вологість, % - температура, °С	95-98 40	95-100 40	93-100 50		-	-
Стійкість до дії морського туману: - склад розчину, г/л - водність, г/м ³ - температура, °С - дисперсність, не більше	-	33 2-3 25-35 20	33 2-3 25-35 20		-	-
Стійкість до дії обледеніння, інею, роси: - вологість, % - температура, °С	-	95-98 -20/+25	95-98 -30/+28		-	-

1.2.4 Вимоги до ергономіки та естетики

Ергономічні вимоги які висуваються до системи “людина-виріб-середовище використання”, містять:

- антропометричні вимоги , які враховують геометричні пропорції тіла людини;
- фізіологічні вимоги, які характеризують ступінь відповідності виробу силовим параметрам органів руху людини;
- психофізіологічні вимоги, які характеризують швидкість і темп руху частин тіла та характеристику зору;
- психологічні вимоги, які характеризують ступінь відповідності виробу можливостям людини у сприйнятті, зберіганні і переробці інформації;
- гігієнічні вимоги, які характеризують безпосередній навколишній вплив середовища: температури, вологості, тиску, освітленості, рівня шуму, вібрацій, перевантажень, рівня випромінювання та напруженості електричного, магнітного, електромагнітного полів;

Естетичні вимоги містять:

- інформаційну виразність, яка характеризує здатність виробу відображувати у формі естетичні уявлення, що склалися у суспільстві;

Таблиця 1.7 – Норми надійності професійної наземної РЕА

Група	Число радіоелементів, в тому числі інтегральних мікросхем та мікропроцесорів	Середнє напрацювання на відмову, год		
		РЕА на напівпровідникових пристроях і менше 5% інтегральних мікросхем	Комбінована на напівпровідникових приладах і більш 5% інтегральних мікросхем та мікропроцесорів	РЕА на інтегральних мікросхемах та мікропроцесорах
1 - 2	До 1000	2500	3500	5000
	1001-2000	2000	3000	4500
	2001-3000	1500	2500	4000
	3001-4000	1000	2000	3500
	Більше 4000	700	1500	3000
3 - 5	До 700	2000	3000	5000
	701-1000	1500	2500	4500
	1001-2000	1000	2300	4000
	2001-3000	700	2000	3500
	більше 3000	500	1400	3000
6 - 7	До 200	3000	4000	6000
	201-300	2500	3500	5500
	301-700	2000	3000	5000
	701-1000	1500	2500	4500
	1001-2000	1000	2000	4000

- раціональність форми, яка характеризує відповідність форми умовам виготовлення і експлуатації виробу, проявляється у відповідності форми виробу його призначенню, конструкторському рішенню, особливостям технології та матеріалам;

- цілісність композиції, яка характеризує гармонічну єдність частин і цілого, взаємозв'язок елементів форми виробу;

- досконалість виробничого виконання характеризується чистотою виконання контурів і прилеглих частин, акуратністю покриття, чіткістю виконання фірмових знаків та експлуатаційною документацією.

1.2.5 Вимоги до технологічності та уніфікації

Під технологічністю конструкції розуміють сукупність властивостей, які визначають її пристосованість до раціонального використання трудових і матеріальних ресурсів при підготуванні виробництва і промислового випуску, а також при експлуатації та ремонті. Розрізняють виробничу та експлуатаційну технологічність.

Виробнича технологічність містить комплекс вимог:

- підвищення застосовності виробу і його складових частин з допомогою уніфікації та стандартизації;
- обмеження номенклатури складових частин конструкції;
- застосування високопродуктивних і маловідходних технологічних рішень, оснований на типізації технологічних процесів, досягненні раціонального рівня механізації та автоматизації праці у виробництві;
- використання конструкторських рішень, які дозволяють знизити витрати на доступ до складових частин, їх установлення і зняття, забезпечує взаємозамінність;
- застосування обґрунтованих сортаментів і марок матеріалів, що дозволяє знизити матеріалоємність виробу.

Експлуатаційна технологічність містить деякі попередні та додаткові вимоги:

- використання конструкторських рішень, які дозволяють знизити витрати на транспортування виробу, техконтроль та експлуатацію;
- використання конструкторських рішень, які забезпечують умови технічного обслуговування і ремонту.

1.2.6 Патентно-правові вимоги

Патентно-правові вимоги характеризують захисну здатність виробу і його патентну чистоту.

Вимоги захисної здатності містять новизну технічного рішення, корисність і юридичне оформлення у вигляді авторського свідоцтва і патенту.

Технічне рішення має новизну, якщо до дати пріоритету його сутність не стала широко відомою. Технічне рішення має суттєву відмінність, якщо у порівнянні з рішеннями, відомими до дати пріоритету, воно характеризується новою сукупністю ознак, які дають позитивний ефект.

Корисністю називають стабільний позитивний ефект, який принесе реалізація технічного рішення.

Вимоги патентної чистоти виробу повинні гарантувати відсутність претензій зі сторони володарів патентів в країні використання.

Юридичне оформлення технічного рішення може бути у формі авторського свідоцтва і патенту. Першочергово оформляють авторське свідоцтво, яке на основі експертизи засвідчує визнання технічного рішення винаходом і закріплює за розробником авторство і пріоритет.

Вимоги патентної чистоти виробу повинні гарантувати відсутність претензій зі сторони власників патентів в країні використання.

1.2.7 Вимоги безпеки РЕА

Вимоги безпеки РЕА: прилади повинні бути сконструйовані і виготовлені таким чином, щоб при нормальній експлуатації, а також в умовах несправностей для споживача не створювати небезпеку; повинен

бути забезпечений захист від ураження електричним струмом, дії високих температур, дії іонізуючого випромінювання.

На приладі повинна бути нанесена інформація: вид живлення, номінальна напруга живлення, частота мережі, споживана потужність, попереджувальні написи.

Попередження загрози ураження електричним струмом має ряд заходів:

- доступні частини приладу не повинні знаходитись під небезпечною напругою. Напругу кваліфікують як небезпечну, якщо між випробувальною частиною пристрою і об'єктом протікає змінний струм 0,7 мА або постійний струм не більше 2 мА;

- ізоляція деталей, що знаходяться під напругою, не повинні виготовлятися з гігроскопічних матеріалів:

- конструкція пристрою повинна усувати ураження струмом в процесі регулювання.

На основі даних вимог складається технічне завдання на проектування конструкції (ТЗ), яке має структуру:

- найменування пристрою;

- призначення виробу;

- комплектність виробу, де необхідно подати склад виробу для його експлуатації, наприклад: кабелі, з'єднувачі, окремі блоки;

- технічні параметри. У цьому пункті необхідно подати основні параметри РЕА, які впливають на конструкцію пристрою, наприклад, споживана потужність, робочий діапазон радіочастот, робочі напруги та струми в колах пристрою.

- характеристики стандартизації та уніфікації, де необхідно визначити типові конструкції блоків, каркасів, пультів тощо, система яких регламентується стандартом ГОСТ 20504-81. Для оцінювання рівня стандартизації виробу використовуються коефіцієнти застосовності K_a та повторності K_l стандартизованих, нормалізованих та уніфікованих складових частин виробу;

- вимоги до конструкції. В цьому пункті установлюють вимоги до зовнішнього вигляду виробу, що визначаються правилами технічної естетики та умовами експлуатації. Тут можуть бути указані: форма виробу (прямокутна, циліндрична), колір та матеріал покриття, габаритні розміри та маса виробу. Особливо обумовлюється рівень генеруючого шуму (дБ), допустима температура поверхні корпусу, інтенсивність електромагнітного випромінювання;

- характеристики зовнішніх впливів. До характеристик зовнішніх впливів відносяться: діапазон температур, відносна вологість, діапазон частот, вібрації, амплітуда віброприскорення, лінійне прискорення тощо.

- інтерфейс оператора. В цьому пункті обумовлюються вимоги ергономіки до конструкції РЕА;

- вхідна-вихідна інформація;

- надійність. В цьому пункті задається середній час напрацювання виробу або ймовірність безвідмовної роботи за певний час. Тут ще можуть бути обумовлені методи випробування на надійність. Визначаються також вимоги до умов транспортування і зберігання та ремонтпридатність;

- техніка безпеки;

- вимоги до виробництва. У цьому пункті необхідно обумовити програму випуску певного виробу, а також орієнтовну собівартість пристрою.

1.3 Технічне завдання на проектування

Державним стандартом ДСТУ 3974 – 2000 передбачаються правила складання технічного завдання для НДР (дипломні роботи та курсові роботи) та ДКР (дипломні та курсові проекти).

1.3.1 Технічне завдання для дослідно-конструкторських робіт

Технічне завдання має складатися із таких розділів:

- назва ДКР;
- виконавці ДКР;
- виробник дослідних зразків;
- мета виконання і призначення продукції;
- склад продукції;
- технічні вимоги;
- техніко-економічні вимоги;
- вимоги до сировини, матеріалів та комплектуючих виробів;
- вимоги до консервації, пакування і маркування;
- вимоги до розроблюваної документації;
- стадії і етапи ДКР;
- порядок приймання ДКР.

У перших трьох розділах зазначають повну назву, шифр ДКР, виконавців і виробників із зазначенням адреси і всіх необхідних реквізитів.

У розділі “**Технічні вимоги**” перелічують вимоги і норми, технічні характеристики та показники, які визначають призначення, умови експлуатації і можливості застосування продукції.

У розділі викладають вимоги до таких показників продукції:

- призначення;
- життєздатності та стійкості до зовнішніх впливів і чинників;
- надійності;
- конструкції;
- технологічності;
- уніфікації і стандартизації;
- метрологічного забезпечення виробництва і експлуатації;
- дизайну, ергономіки та технічної естетики;
- експлуатації, зручності технічного обслуговування та ремонту;
- безпеки для життя, здоров'я та охорони довкілля;

- сумісності;
- взаємозамінності;
- транспортування і зберігання;
- якості і технічного рівня.

Вимоги призначення включають:

- технічні параметри, які забезпечують виконання пристроєм своїх функцій;
- порядок і спосіб взаємодії з об'єктами, які з'єднуються з пристроєм;
- імовірно-часові та інші характеристики і показники (час готовності до використання, час безперервної або циклічної роботи);

Вимоги надійності включають:

- показники надійності;
- критерії відмов і граничного стану продукції (безвідмовність, тривалість, збереженість);
- вимоги до конструктивних і експлуатаційних способів збереження надійності.

У вимогах до конструкції наводять:

- габаритні і приєднувальні розміри;
- спосіб кріплення;
- засоби регулювання і органи настроювання;
- вид виконання (блочний, моноблочний);
- обмеження щодо маси виробу;
- використання базових конструкцій;

Вимоги технологічності включають:

- вимоги до виробничої, експлуатаційної і ремонтної технологічності згідно з ГОСТ 14.201 – 83;
- вимоги щодо використання прогресивних технологічних процесів, застосування уніфікованого, типового устаткування та технологічного оснащення.

У вимогах уніфікації та стандартизації наводять кількісні показники щодо стандартизації продукції (коефіцієнти повторюваності, застосовності, міжпроектної уніфікації).

Вимоги метрологічного забезпечення виробництва і експлуатації включають:

- вимоги до метрологічного забезпечення вимірювань та контролю параметрів продукції;
- обґрунтування вимог до проведення метрологічної експертизи, приймальних випробувань;
- обґрунтування необхідності розроблення засобів перевірки (калібрування), атестації випробувального обладнання.

Вимоги до дизайну, ергономіки та технічної естетики включають:

- вимоги до дизайну, які визначають композиційну цілісність, інформаційну і художню виразність, раціональність форми, стилістичну

відповідність форми сучасному рівню (ДСТУ 3943 - 2000 , ДСТУ 3944 - 2000);

- загальні ергономічні вимоги до робочих місць під час виконання робіт (ГОСТ 12.2.032 - 78, ГОСТ12.2.033 - 78).

Вимоги до експлуатації, зручності технічного обслуговування та ремонту включають:

- умови експлуатації (робочі, граничні);
- експлуатаційні та чергові режими;
- запобіжні заходи щодо несанкціонованого застосування;
- системи засобів експлуатаційного контролю;
- види періодичності, обсягу технічного обслуговування та ремонту (календарний, за ресурсом, за технічним станом);
- зручності складання і розбирання виробу під час обслуговування і ремонту;
- види комплектів запасних частин і інструменту.

У вимогах сумісності зазначають:

- номенклатуру параметрів електромагнітної сумісності радіотехнічних засобів відповідно до ДСТУ 2793 - 94;
- допустимі кількісні значення параметрів технічних характеристик випадкових радіозавад;
- методи вимірювання зазначених у ТЗ параметрів.

У вимогах до взаємозамінності зазначають вимоги щодо забезпечення механічної, функціональної та інформаційної взаємозамінності одноіменних складових частин.

Вимоги до транспортування і зберігання включають:

- види транспортування (повітряний, залізничний, морський, автомобільний), якими дозволено транспортувати;
- параметри транспортування (швидкість, дальність, атмосферний тиск);
- кліматичні умови під час транспортування;
- умови зберігання (температурний режим, термін, порядок переконсервування).

У вимогах до якості і технічного рівня наводять градацію, якій за своїм рівнем повинна відповідати продукція (переважає світовий рівень, відповідає світовому рівню);

У розділі “**Техніко-економічні вимоги**” наводять вимоги щодо автоматизації проектно-конструкторських робіт, орієнтовну економічну ефективність і термін окупності витрат, лімітну вартість, орієнтовну річну потребу у продукції, а також економічні переваги порівняно з аналогом.

У розділі “**Вимоги до сировини, матеріалів і комплектації**” наводять:

- вимоги до покупних виробів;
- можливість застосування дефіцитних матеріалів і дорогоцінних металів;

- можливості застосування виробів невітчизняного виробництва.

У розділі “**Вимоги до консервації, пакування і маркування**” наводять вимоги до консервації, пакування, маркування продукції.

У розділах “**Вимоги до розроблюваної документації**” та “**Стадії та етапи ДКР**” наводять склад КД на продукцію та назви стадій і етапів розроблення КД.

1.3.2 Технічне завдання на проведення науково-дослідної роботи

Технічне завдання складається з таких розділів:

- підстава для виконання роботи;
- мета і призначення НДР;
- вихідні дані для проведення НДР;
- виконавці НДР;
- вимоги до виконання НДР;
- етапи НДР і терміни їх виконання;
- очікувані результати та прядок реалізації;
- матеріали, які подають під час закінчення НДР;
- порядок приймання НДР;
- вимоги до розроблення документації.

У розділі “**Мета і призначення НДР**” наводять коротку характеристику та оцінку стану проблеми, що її вирішують, визначають головну мету і задачі роботи, її актуальність та дають обґрунтування необхідності виконання.

У розділі “**Вихідні дані для проведення НДР**” зазначають, що НДР проводиться уперше або є продовженням попередніх робіт та наводять перелік документів, які необхідно використати під час роботи.

У розділі “**Вимоги до виконання НДР**” наводять основні технічні вимоги: якісні і кількісні показники, які мають бути досягнуті у процесі виконання, вимоги до способів оброблення первинних матеріалів, обґрунтування необхідності створення первинних макетів.

У розділі “**Очікувані результати та порядок реалізації**” наводять передбачувані способи реалізації результатів НДР та обґрунтування їхньої ефективності.

У розділах “**Матеріали, які подають під час закінчення НДР**”, “**Порядок приймання НДР**” наводять перелік документів, що подають до приймання та порядок приймання.

У розділі “**Вимоги до розроблення документації**” наводять конкретний склад звітної документації (наукові висновки, моделі, методики, програми, технічні регламенти, розрахунки, положення, інструкції). Крім того визначають спосіб виконання документації, кількість комплектів документації та організації, яким необхідно відіслати комплект документації.

Контрольні питання:

1. Які етапи існують при проектуванні радіоелектронних пристроїв?
2. В чому полягає проведення ДКР?
3. В чому полягає проведення НДР?
4. Як поділяються радіоелектронні пристрої за класом використання?
5. Які є кліматичні виконання для конструкцій РЕА?
6. Що таке бортова апаратура?
7. Що таке морська апаратура?
8. Як класифікується наземна апаратура?
9. Як формуються вимоги до апаратури за надійністю?
10. Що включають вимоги до ергономіки та дизайну?
11. Що включають технологічні вимоги?
12. Які розділи входять до технічного завдання на ОКР?
13. Які розділи входять до технічного завдання на НДР?
14. Хто складає технічне завдання?
15. Що таке ескізний проект у конструюванні?
16. Що таке технічний проект при конструюванні?
17. Що таке робоча документація?
18. Що включають патентно-правові вимоги?
19. Які вимоги забезпечують безпеку роботи пристроїв РЕЗ?
20. Який стандарт регламентує правила побудови технічного завдання?

2 КОНСТРУКТОРСЬКА ДОКУМЕНТАЦІЯ

Конструкторські документи (КД) – документи, які визначають склад, принципи побудови радіоелектронної апаратури та вміщують необхідні дані для його розробки, виготовлення, контролю, експлуатації й ремонту.

2.1 Види конструкторських документів

Конструкторська документація поділяється на графічну і текстову.

Графічні конструкторські документи – документи, в яких з допомогою встановлених стандартом символів і правил визначають склад, принцип дії, будову і зв'язки між окремими частинами виробу. До них відносять:

- креслення деталі – зображення деталі і дані для її виготовлення та контролю;
- складальне креслення – зображення виробу і дані необхідні для його складання і контролю;
- креслення загального виду – зображення конструкції виробу, яке дає уявлення про взаємодію його складових частин і принцип роботи;
- габаритне креслення – контурне зображення виробу з габаритами, встановлювальними і приєднувальними розмірами;
- монтажне креслення – контурне зображення виробу, яке вміщує дані для з'єднання складових частин пристрою з допомогою кабельних систем;
- схема – умовне зображення або позначення складових частин виробу і зв'язків між ними;
- специфікація – склад складальної одиниці, комплексу або комплекту.

Текстові конструкторські документи – документи, які вміщують опис пристрою, принцип дії та експлуатаційні показники виробу. До них відносять:

- відомість специфікацій (ГОСТ 2.106 - 68) – перелік всіх специфікацій складових частин виробу з вказанням їх кількості та куди вони входять;
- відомість документів, на які є посилання – перелік документів, на які є посилання в конструкторській документації, для можливості забезпечення виробника цією документацією;
- відомість покупних деталей – перелік всіх радіоелементів, які використовуються у пристрої, із посиланням на загальну кількість за номіналами;
- відомість утримувачів оригіналів (ГОСТ 2.112 - 70) – містить перелік підприємств, на яких зберігають оригінали документів;

- пояснювальна записка (ГОСТ 2.106 - 68) - це документ, який містить опис пристрою і принцип дії, обґрунтування прийнятих рішень, необхідні розрахунки;

- програма і методика випробувань (ГОСТ 2.106 - 68) - це текстовий документ, в якому подають дані, що підлягають перевірці при випробуванні пристрою та порядок і методи контролю. Цей документ повинен передбачувати: перевірку відповідності виробу кресленням, технічним умовам, паспортним даним і метрологічним нормам; визначення показників якості і надійності роботи; перевірку зручності роботи і проведення ремонту; відповідність вимогам технічної безпеки; встановлення тривалості і режиму випробування; необхідні заміри і засоби контролю;

- патентний формуляр (ГОСТ 2.110 - 68) містить відомості про патентну чистоту виробу, а також відомості про використані при розробці вітчизняні винаходи;

- карта технічного рівня (ГОСТ 2.116 - 71) – містить дані, які визначають рівень якості виробу і відповідають його технічним та економічним показникам;

- технічні умови (ГОСТ 2.114 - 70) – розробляються при відсутності стандартів на продукцію.

Експлуатаційна документація – призначена для вивчення виробу і правил його експлуатації (ГОСТ 2.601 - 68). До цих документів відносять:

- технічний опис – призначений для вивчення виробу, який містить опис структури пристрою, принцип дії, технічні характеристики;

- інструкція щодо експлуатації – містить інформацію про правильну експлуатацію пристрою та підтримання його у постійній готовності до роботи. У цьому документі вказують: роботи і операції, що проводять з виробом; необхідні прилади, інструменти і спеціальне обладнання; заходи, що вживаються обслуговуючим персоналом при аварійних ситуаціях;

- інструкція із технічного обслуговування – вказує порядок і правила технічного обслуговування виробу при різних умовах експлуатації, а також спеціальне обладнання, стенди, прилади та інструмент;

- інструкція із монтажу – дає інформацію правильного проведення монтажних операцій, пуску, регулювання, що проводяться безпосередньо на місці експлуатації;

- формуляр – документ, який свідчить про основні параметри і технічні характеристики виробу у процесі експлуатації;

- паспорт – документ, який свідчить про гарантовані підприємством-виробником технічні характеристики виробу;

- етикетка – короткий виклад основних технічних показників пристрою.

2.2 Схемна документація на радіоелектронні засоби

2.2.1 Класифікація та позначення схем

Схема - це конструкторський документ, на якому позначені у вигляді умовних зображень або позначень складові частини виробу і зв'язки між ними. Схеми поділяються на види та типи в залежності від призначення виробу, складових його елементів та зв'язків між ними. Види та типи схем, їх позначення і загальні правила виконання наведені у ГОСТ 2.710-84; правила виконання електричних схем - у ГОСТ 2.702-75; правила виконання електричних схем цифрової обчислювальної техніки - у ГОСТ 2.708-84.

Види схем позначають великими літерами українського алфавіту: Е - електрична; Г - гідравлічна; П - пневматична; К - кінематична. Л - оптична; В - вакуумна; С - комбінована.

Типи схем позначають цифрами: 1 - структурна; 2 - функціональна; 3 - принципова; 4 - з'єднань; 5 - підключення; 6- загальна; 7- розміщення; 8 - інші; 9- об'єднана.

Схемам, що входять до складу КД, присвоюють код, який складається з літери і цифри, що відповідно визначають вид та тип схеми.

Приклад позначення схеми електричної принципової з порядковим номером 12;

ВНТУ 411528.012ЕЗ

де ВНТУ - код підприємства-розробника;

411528 - код класифікаційної характеристики за класифікатором ЄСКД;

012 - порядковий реєстраційний номер;

ЕЗ - код схеми електричної принципової.

Загальний порядок позначення виробу та конструкторських документів встановлює ГОСТ 2.201- 80.

Принципова схема включає в себе повний склад елементів, зв'язків між ними, дає детальне уявлення про принцип роботи виробу, служить основою для розробки іншої КД; її використовують при вивченні, регулюванні, контролі та ремонтуванні виробу.

При проектуванні схем необхідно керуватися вимогами стандартів [6-8], а також рекомендаціями [9, 17].

На схемах допускається подавати різні технічні дані, що розкривають призначення виробу та пояснюють його роботу (наприклад, часові діаграми, таблиці сигналів, спеціальні вимоги до монтажу).

2.2.2 Умовне графічне та літерне позначення елементів

Кожному елементу на схемі повинно відповідати своє умовне графічне позначення (УГП), що одночасно визначає тип елемента. Вид та розміри УГП визначені ГОСТ 2.728-74; ГОСТ 2.730-73; ГОСТ 2.743-82; ГОСТ 3.751-73; ОСТ 4.010.009. Приклади УГП наведені у [17].

Кожний елемент схеми повинен мати умовне літерно-цифрове позначення (УЛП); літерне позначення являє собою скорочене найменування елементів, складене з його початкових або характерних літер; після літери проставляють порядковий номер елемента. Порядковий номер визначають у межах груп ЕРЕ, яким на схемі присвоєно однакове позначення. Літерно-цифрове позначення присвоюють ЕРЕ у послідовності розміщення елементів даного типу на схемі, як правило, зверху донизу та зліва направо, проставляють поряд з УГП ЕРЕ праворуч або над ним. Виконують їх одним шрифтом (3; 5).

Приклади УЛП за ГОСТ 2.710-81 наведені у [17].

Якщо ЕРЕ складаються з декількох функціональних вузлів (ФВ), як наприклад деякі ІМС, то кожному ФВ одного елемента присвоюють подвійну нумерацію, що означає номер ЕРЕ на схемі та номер ФВ у межах даної ІМС. УЛП вказують в основному полі УГП логічного елемента під символом його функції або над УГП.

Характеристики вхідних та вихідних кіл та адресу зовнішніх з'єднань записують у таблиці, що подаються замість УГП вхідних (вихідних) елементів (роз'єм, плата і таке інше). Кожній таблиці присвоюють позиційне позначення заміненого елемента (X1;X2...). Оформлення таблиці наведено у [17].

2.2.3 Спрощення у схемах

Допускається обривати лінії зв'язку, якщо вони утруднюють читання схеми. В цьому випадку їх закінчують стрілками, біля яких позначають місця підключення.

Лінії зв'язку, що переходять на інший лист схеми, обривають. Поряд з обривом лінії розміщують позначення або найменування лінії зв'язку і в круглих дужках подають номер листа, на який переходить лінія зв'язку. Допускається літерно-цифрове позначення ліній зв'язку.

Для спрощення креслення схеми та для зручності її використання електрично не зв'язані між собою лінії зв'язку зливають в загальну потовщену лінію; при підході до контактів ЕРЕ кожен з ліній зображують окремо, а початок та кінець лінії зв'язку нумерують однаковими цифрами. В межах кожної лінії злиття ведеться своя нумерація ліній зв'язку.

Виводи кіл "живлення" та "землі" для ІМС однієї серії або декількох споріднених серій не зображають, а подають словесну або табличну вказівку про підключення цих кіл до ІМС.

2.2.4 Оформлення переліку елементів

У кожній схемі повинен бути перелік елементів, який виконують у вигляді окремого документа на листі формату А4 за стандартом ГОСТ 2.701-84. Приклади виконання переліку елементів наведені у додатку А.

В графі «**Позиційне позначення**» наводять літерне позначення елементів у порядку латинського алфавіту та числового зростання. У переліку елементів не допускається об'єднувати позначення радіоелементів, якщо вони ідуть не підряд.

В графі «**Найменування**» записується повна назва радіоелемента, включаючи технічні умови. Для спрощення оформлення переліка елементів допускається спільну частину назви виносити у заголовок (шапку). В цьому випадку шапку необхідно підкреслювати.

Контрольні питання:

1. Що таке конструкторська документація?
2. Для чого виконують конструкторську документацію?
3. Як поділяється конструкторська документація?
4. Що входить до складу графічної документації?
5. Що входить до складу текстової документації?
6. За яким документом проводиться випробування пристрою після його виготовлення?
7. Хто користується експлуатаційною документацією?
8. Яку документацію розробляє в основному інженер-схемотехнік?
9. На які групи поділяються схеми?
10. Чим відрізняється схема структурна від схеми принципової електричної?
11. Які спрощення існують при розробленні схеми електричної принципової?
12. За яким принципом будують перелік елементів?
13. Чим відрізняється патентний формуляр від формуляра?
14. Що входить до пояснювальної записки?
15. В якому випадку розробляють технічні умови?
16. Яким документом засвідчує гарантію технічних характеристик підприємство-виробник?
17. Що включає інструкція з експлуатації?

3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

3.1 Основні терміни та визначення

Надійністю називається властивість об'єкта виконувати задані функції в певних умовах експлуатації при збереженні значень установлених експлуатаційних показників у заданих межах протягом певного часу, які відповідають заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, ремонту, зберігання та транспортування.

Надійність – це фізична властивість об'єкта (виробу) яка залежить від кількості і якості його складових елементів, від умов, в яких він експлуатується та від ряду інших причин.

В загальному об'єкти можуть знаходитись у двох станах: в працездатному та непрацездатному. Працездатністю називається такий стан об'єкта, при якому він здатний виконувати задані функції з параметрами, які встановлені вимогами технічної документації.

Подія, яка характеризується порушенням працездатності об'єкта, називається відмовою. За характером виникнення відмови поділяються на раптові (різка, практично миттєва зміна величини головного параметра) та поступові, що виникають за рахунок повільної, поступової зміни цього параметра. Головним називають такий параметр, який характеризує основні властивості об'єкта. У випадку, коли неможливо спостерігати поступові зміни головного параметра, відмова вважається раптовою. Приклади раптових відмов: перегорання струмопровідного шару резистора, пробивання конденсатора і т.д.. Поступова зміна ємності конденсаторів в результаті їх тривалої експлуатації, що приводить до відмови апаратури, є прикладом поступових відмов.

Всі вироби поділяються на відновлювальні і невідновлювальні.

Відновлювальні – такі вироби, працездатність яких у випадку виникнення відмови підлягають відновленню. У невідновлювальних виробів відмови не усуваються. До числа останніх відносяться майже всі радіокомпоненти (резистори, конденсатори, транзистори, мікросхеми і т.д.), а також окремі категорії радіоелектронної апаратури, наприклад апаратура ракет.

Крім наведених термінів їх перелік досить великий. Визначення таких термінів в повному обсязі наведені в ДСТУ 2992-95 (ГОСТ 13377-75) та [1],[2].

3.2 Кількісні характеристики надійності та їх властивості

Одним з основних показників надійності є ймовірність безвідмовної роботи, тобто ймовірність того, що в заданому проміжку часу відмов в системі не виникне

$$P(t_i) = P\{T > t_i\}, \quad (3.1)$$

де T – випадкова величина, яка характеризує час напрацювання системи до виникнення відмов;

t_i - фіксований інтервал часу, наприклад $(0; t_i)$.

Ймовірність виникнення відмов в системі $Q(t_i)$ називають ймовірністю того, що в період t_i в ній обов'язково виникне відмова, тобто

$$Q(t_i) = P\{T < t_i\}. \quad (3.2)$$

Оскільки система може знаходитись тільки в двох станах (працездатна та непрацездатна), то ці події складають повну групу несумісних подій, тому:

$$P(t_i) + Q(t_i) = 1, \quad (3.3)$$

а

$$P(t_i) = 1 - Q(t_i). \quad (3.4)$$

Фізичний зміст $P(t_i)$ полягає в тому, що ця ймовірність характеризує частку працездатних виробів в момент часу t_i .

Коли розглядають інтервал часу $(t_1; t_2)$, а не $(0; t_1)$, тобто не з моменту включення системи, то мова йде про умовну ймовірність безвідмовної роботи $P(t_1; t_2)$ в період $(t_1; t_2)$. При цьому вважається, що система знаходилась в працездатному стані.

$$P(t_1; t_2) = P(t_2) / P(t_1), \quad (3.5)$$

де $P(t_1)$ та $P(t_2)$ - відповідно значення функції надійності на початку інтервалу t_1 і в кінці t_2 напрацювання.

Густина розподілу напрацювання до відмови – це похідна за часом від функції відмови

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (3.6)$$

Цей показник характеризує безумовну ймовірність того, що система обов'язково відмовить в проміжку часу $(t; t + \Delta t)$ при умові, що в момент t вона знаходилась в працездатному стані.

Найбільш поширеним кількісним показником надійності є інтенсивність відмов $\lambda(t)$ - тобто умовна ймовірність виникнення відмов в системі в деякий момент часу напрацювання при умові, що до цього моменту відмов у системі не було.

$$\lambda(t) = f(t) / P(t). \quad (3.7)$$

З фізичної точки зору інтенсивність відмов показує, яка частка всіх виробів або елементів даного типу в середньому стає непрацездатною за 1 годину роботи. Наприклад, якщо $\lambda = 10^{-5}$, то це означає, що за годину роботи із ладу вийде одна стотисячна частка елементів. За 1000 годин роботи можна очікувати, що непрацездатними стане одна сота частка всіх елементів. Тобто якщо в пристрої є 100 таких елементів, то в середньому за кожні 1000 годин із ладу виходе один елемент.

Значення $\lambda(t)$ довідкові для всіх відомих елементів [1],[2],[3].

Експериментально встановлено, що для більшості елементів, які використовуються в РЕА, залежність λ від часу має такий вигляд:

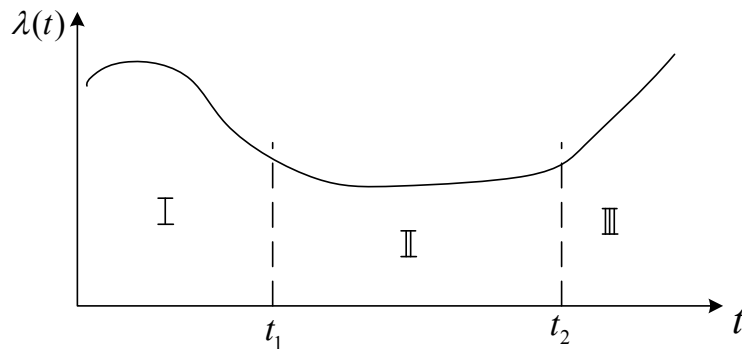


Рисунок 3.1- Залежність інтенсивності відмов від часу

На рисунку 3.1 час від початку роботи до t_1 називають періодом припрацювання (ранні відмови). З виходом із ладу таких елементів інтенсивність відмов зменшується і на інтервалі $t_1 \div t_2$ вважається, що вона майже постійна. Це період нормальної роботи і в цей час відбуваються, в основному, раптові відмови. Визначаючи надійність апаратури, необхідно врахувати, що використовуються такі значення інтенсивності відмов λ , які мають місце в період нормальної роботи.

Інтервал часу після t_2 визначається закономірними процесами старіння та зносу матеріалів і елементів. В цей період відбуваються переважно поступові відмови.

Як показник надійності систем також використовують середнє напрацювання до відмови $T_{сер}$ – це математичне очікування напрацювання до першої відмови

$$T_{сер} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (3.8)$$

За своєю суттю $T_{сер}$ – середній час безвідмовної роботи, тобто час очікування нормальної роботи системи до першої відмови.

Одна із найважливіших формул теорії надійності невідновлювальних систем – це залежність ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$ від інтенсивності відмов. Відомо, що

$$f(t) = \frac{dQ}{dt}, \quad a \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (3.9)$$

Звідси

$$P(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)} = \frac{dQ}{dt} / \lambda(t). \quad (3.10)$$

Тоді

$$\lambda(t) = - \frac{dp}{dt} / P(t). \quad (3.11)$$

Або

$$- \int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t \frac{dp / dt}{P(t)} dt = \int_0^t \frac{p'}{P(t)} dt = \ln P(t), \quad (3.12)$$

$$\text{тобто} \quad -\int_0^t \lambda(t) dt = \ln P(t). \quad (3.13)$$

$$\text{Звідси} \quad P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3.14)$$

Слід відзначити, що всі відмови протягом трьох станів (рисунок 3.1) носять випадковий характер. Тип розподілу випадкової величини напрацювання на відмову залежить від особливостей процесу розвитку відмови. Найбільш поширений закон розподілу відмов – це експоненціальний. По-перше, він характерний для складних систем, які складаються із різнорідних елементів з різними інтенсивностями відмов. По-друге, для цього закону отримані відносно прості форми для розрахунку надійності. Експоненціальний розподіл можна використовувати в тих випадках, коли нехтують впливом припрацювання, зносу та старіння. Тому цей закон найбільш точно описує відмови на другому етапі, тобто на етапі нормальної роботи. Оскільки вважається, що на цьому етапі $\lambda = \text{const}$, то основні показники надійності описуються такими формулами:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t}; \quad (3.15)$$

$$T_{\text{сер}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda}; \quad (3.16)$$

Якщо апарат складається із n різних елементів (блоків), то загальна інтенсивність відмов визначається як їх сума:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3.17)$$

Залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу має експоненціальний вигляд (рисунок 3.2).

Значення площі під кривою загибелі визначає величину $T_{\text{сер}}$. Маючи в своєму розпорядженні залежність $P(t)$ (рис. 3.2), можемо з його допомогою визначити $T_{\text{сер}}$. Для цього необхідно скористатись таким виразом:

$$P(T_{\text{сер}}) = e^{-\lambda T_{\text{сер}}} = e^{-\lambda \cdot \frac{1}{\lambda}} = \frac{1}{e} = 0,37. \quad (3.18)$$

3.3 Розрахунок надійності неремонтопридатних систем за раптовими відмовами

Розрахунок надійності полягає у визначенні кількісних показників надійності системи за значеннями характеристик надійності елементів. Для розрахунку надійності аналітичним методом необхідно мати модель надійності системи, яка складається на основі її електричної (функціональної) схеми. Як моделі при розрахунку надійності, як

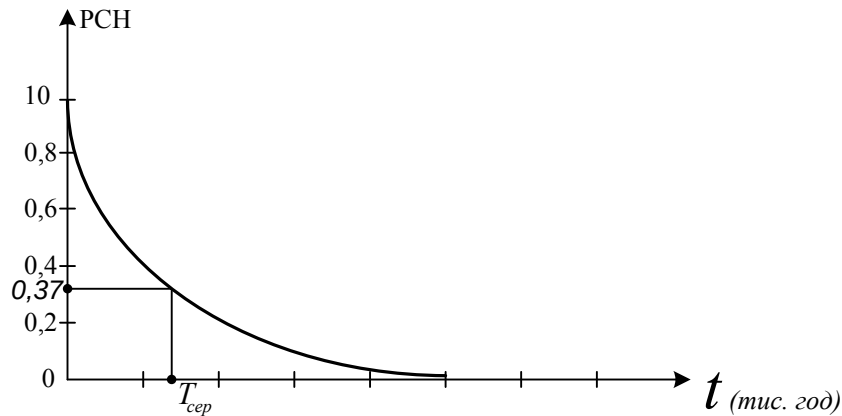


Рисунок 3.2 – Залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу

правило, використовують логічні схеми надійності і схеми станів (графи переходів). Останні використовують для складання диференціальних рівнянь ймовірностей станів (рівнянь Колмогорова), які описують схеми «загибелі». Але розрахунок цих рівнянь дає ймовірність знаходження системи в якомусь стані, а не ймовірність її безвідмовної роботи і при цьому дану модель можна використовувати тільки при умові показникового розподілу напрацювання до відмови. Отримати характеристики надійності за цими рівняннями складніше, ніж з допомогою логічних схем. Тому, в основному, використовується перша модель.

Логічна схема є логічною моделлю безвідмовної роботи системи. Припускається, що відмови елементів схеми незалежні, елементи електричної схеми та системи можуть знаходитись тільки в двох станах: працездатному та непрацездатному.

Перед складанням логічної схеми проводиться аналіз функціонування системи та елементів на задане напрацювання. Визначається зміст термінів «безвідмовна робота системи» та «відмова». Перелічуються та описується можливі відмови елементів і системи, оцінюється вплив відмови кожного елементу на працездатність системи.

При складанні логічної схеми електричні (функціональні) зв'язки між елементами замінюються логічними, які характеризують безвідмовну роботу системи в залежності від працездатності і несправності елементів. При цьому можливо послідовне та паралельне ввімкнення елементів за надійністю.

Елемент, відмова якого приводить до відмови всієї системи (апарата), називається послідовно з'єднаним на логічній схемі. В цьому випадку відмова системи настає при відмові одного елементу. Таке ввімкнення елементів називають ще основним.

Для цього випадку ймовірність безвідмовної роботи системи протягом заданого напрацювання $(0; t_i)$ при умові незалежності відмов елементів визначається як

$$P(t_i) = \prod_{j=1}^N P_j(t_i), \quad (3.19)$$

де N – кількість елементів при основному ввімкненні елементів системи;

$P_j(t_i)$ - ймовірність безвідмовної роботи j -го елемента.

Цю формулу можна подати у вигляді:

$$P(t_i) = \exp \left[- \sum_{j=1}^N \int_0^{t_i} \lambda_j(t) dt \right] \quad (3.20)$$

Для інтервалу II (рисунок 3.1) $\lambda_i(t) = \lambda = const$, то

$$P(t_i) = \exp \left[-t \sum_{i=1}^N \lambda_i \right] \quad (3.21)$$

де λ_i - інтенсивність відмов i -го елемента схеми.

Елемент, відмова якого не приводить до відмови системи в цілому, вмикається паралельно за логічною схемою. Безвідмовна робота системи для цього випадку має місце при збереженні працездатності хоча б одним елементом. Така логічна схема в основному використовується при певних видах резервування.

Логічні схеми складаються в такій послідовності. Спочатку будують логічну схему системи, яка складається із блоків. Далі складається логічна схема кожного блока, яка включає вузли блока, а логічна схема вузла складається із комплектуючих елементів, що входять в його склад.

Таким чином, основна модель для розрахунку надійності – це послідовна логічна схема. При розрахунку припускається, що основний вид відмов – раптові (II-й період на рисунку 3.1), коли інтенсивність відмов елементів постійна, а ймовірність безвідмовної роботи елементів описується експоненціальним законом.

В залежності від повноти врахування факторів, які впливають на надійність системи, можуть проводитись наближені розрахунки: розрахунок при виборі елементів та остаточний розрахунок. В цьому випадку достатньо оцінити за відповідними таблицями [1,3,4] інтенсивність відмов елементів, визначити сумарну інтенсивність і розрахувати середнє напрацювання на відмову:

$$T_{сер} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}. \quad (3.22)$$

При цьому, як правило, будується залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу:

$$P(t) = \exp \left[-t \sum_{i=1}^N \lambda_i \right] \quad (3.23)$$

Такий розрахунок називається орієнтовним, оскільки не враховуються конкретні умови експлуатації та реальні електричні

навантаження на елементи електричної схеми. Тому цей розрахунок використовується на етапі ескізного проектування.

На етапі технічного проектування в процесі розрахунку надійності ураховуються конкретні умови експлуатації та електричні навантаження на елементах схеми. Причому, з метою покращення роботи системи, реальні електричні навантаження ще можна змінювати.

Поправкові коефіцієнти, які ураховують умови експлуатації, визначаються за відповідними таблицями [1,3]:

- K_1 – призначення апарата;
- K_2 – урахування дії вологості і температури;
- K_3 – урахування дії тиску (висота над рівнем моря).

Щоб визначити, як відрізняються електричні режими елементів від їх номінальних значень, використовують коефіцієнти навантаження K_H . Їх розрахунок та рекомендовані значення наведені в таблиці 3.1

Для визначення величини коефіцієнтів навантаження елементів схеми необхідна наявність відомостей (карт) режимів роботи елементів.

За результатами розрахунку коефіцієнтів навантаження K_H та температури поверхні кожного елементу схеми T визначається поправковий коефіцієнт $a_i = f(K_H, T^{\circ}C)$, [1,3]

Таким чином, значення основних показників надійності систем із урахуванням умов експлуатації і електричних режимів визначаються відповідно за такими формулами:

$$\lambda = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \sum_{i=1}^N \lambda_{0i} \cdot a_i, \quad (3.24)$$

де λ_{0i} - номінальна інтенсивність відмов i -го елементу схеми [1,3,4];

$$T_{сер} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{K_1 K_2 K_3 \sum_{i=1}^N \lambda_{0i} a_i}. \quad (3.25)$$

Будується графік залежності ймовірності безвідмовної роботи від часу, при цьому використовується формула:

$$P(t) = \exp[-\lambda t] = \exp[-t \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \sum_{i=1}^N \lambda_{0i} a_i] \quad (3.26)$$

Такий розрахунок називається апіорним за раптовими відмовами.

Застосування апіорних методів розрахунку надійності обмежується не тільки відсутністю необхідного об'єму апіорної інформації по елементах та операторах систем, але й тим, що при побудові методів розрахунку застосовуються припущення, які не мають місця на практиці. Тому оцінки показників надійності, отримані в апіорних розрахунках, можуть бути далекі від істини. Причому, вказати величину похибки неможливо.

Оцінки надійності, отримані апіорними розрахунками, доцільно застосовувати на стадії проектування і розробки апаратури як орієнтир

Таблиця 3.1 – Коефіцієнт навантаження ЕРЕ

Найменування елемента	Параметри, що контролюються	Коефіцієнт навантаження, K_H	Рекомендовані значення в режимах	
			імпульсний	статистичний
Мікросхеми	Максимальний вихідний струм, $I_{\text{вих макс}}$; Вихідний струм мікросхем, які включені на вході, $I_{\text{вх}}$ Число напружених входів, n	$\frac{\sum_{i=1}^N I_{\text{вх},i}}{I_{\text{вих макс}}}$	-	-
Транзистори	Потужність, що розсіюється на колекторі, P_K	$\frac{P_K}{P_{K \text{ доп}}}$	0,5	0,2
Напівпровідникові діоди	Зворотна напруга, U_0	$\frac{U_0}{U_{0 \text{ доп}}}$	0,5	0,2
Конденсатори	Напруга на обкладинках, U	$\frac{U}{U_{\text{доп}}}$	0,7	0,5
Резистори	Потужність, яка розсіюється, P	$\frac{P}{P_{\text{доп}}}$	0,6	0,5
Трансформатори	Струм навантаження, I_H	$\frac{I_H}{I_{H \text{ доп}}}$	0,9	0,7
Електричні з'єднання	Струм, I_k	$\frac{I_k}{I_{k \text{ доп}}}$	0,8	0,5

для вживання необхідних заходів із доробки схем та зміни елементної бази, а також для порівняння за критерієм надійності різних варіантів побудови системи. Після створення конкретних зразків систем необхідно уточнити орієнтовні розрахункові оцінки надійності проведенням натурних випробувань апаратури на надійність.

Контрольні питання:

1. Що таке надійність радіоелектронних систем?
2. В яких двох станах можуть знаходитись об'єкти з точки зору надійності?
3. Якими показниками характеризується надійність?
4. Що таке ймовірність безвідмовної роботи?
5. Що показує інтенсивність відмов?
6. Від яких параметрів залежить надійність пристроїв?

4 КОНСТРУКТИВНА ІЄРАРХІЯ ЕЛЕМЕНТІВ, ВУЗЛІВ ТА ПРИСТРОЇВ

Радіоелектронні засоби класифікуються за функціональною і конструктивною складністю.

4.1 Класифікація за функціональною складністю

Класифікація за цією ознакою складає чотири конструкційних рівні: радіоелектронний функціональний вузол, радіоелектронний пристрій, радіоелектронний комплекс, радіоелектронна система.

Радіоелектронний функціональний вузол – це засіб, який являє собою функціонально закінчену складальну одиницю, виконану на несучій конструкції, реалізує функцію перетворення сигналу і не має самостійного експлуатаційного застосування.

Радіоелектронний пристрій – засіб, який являє собою функціонально закінчену складальну одиницю, виконану на несучій конструкції і реалізує функції передачі, прийняття, зберігання або перетворення інформації.

Радіоелектронний комплекс – засіб, який являє собою сукупність функціонально зв'язаних радіоелектронних пристроїв, призначених для вирішення складних технічних питань.

Радіоелектронна система – засіб, який являє собою сукупність функціонально зв'язаних радіоелектронних пристроїв і комплексів, як єдине ціле.

4.2 Класифікація за конструктивною складністю

Ієрархічний принцип конструювання є одним з принципів системного підходу при проектуванні РЕА; він полягає у роздрібненні конструкції на структурні рівні, кожен з яких характеризується елементною, конструкторською і технологічною однорідністю. При цьому вироби нижчих структурних рівнів комплектують і відповідно входять у специфікацію виробів більш високого рівня. Відмінною ознакою переходу до більш високого рівня є операція складання.

Конструкції поділяються на чотири конструктивні рівні.

Радіоелектронний модуль нульового рівня – радіоелектронний засіб, який призначений для функції перетворення інформації або перетворення сигналів, виконаний на конструктивній основі, яка розмірно пов'язана з базовою конструкцією вищого рівня і має властивості конструктивної і функціональної взаємозамінності (резистори, мікросхеми).

Радіоелектронний модуль першого рівня – функціонально закінчена комірка або касета, яка виконана на основі базової несучої конструкції першого рівня і має властивості конструктивної і функціональної взаємозамінності (плата з радіoeлементами). Ці конструктивні рівні не мають передніх панелей, а вміщують десятки мікросхем та радіoeлементів. На модуль першого рівня накладається ряд обмежень: єдність форми, типорозмірів виводів. Модулі формують шляхом розділення простору взаємно паралельними і перпендикулярними площинами; при цьому їх конструктивні розміри або повторюються, або кратні базовим розмірам. Оскільки конструкції нижчих конструкторських рівнів (нульового і першого) мало залежать від призначення РЕА і об'єкта їх установа, вони найбільш універсальні придатні для уніфікації та стандартизації.

Радіоелектронний модуль другого рівня – функціонально закінчений блок, або рама, які виконані на основі базової конструкції другого рівня і мають властивості конструктивної і функціональної взаємозамінності.

Радіоелектронний модуль третього рівня – функціонально закінчена радіоелектронна шафа, пульт або стояк, які виконані на основі базової несучої конструкції третього рівня.

Вищі конструктивні рівні складаються з нижчих (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Схема розукрупнення РЕЗ за конструктивною складністю

Побудова конструкції за даною схемою забезпечує:

- економічні переваги при розробці, виробництві і експлуатації РЕЗ;
- можливість одночасного конструювання складових частин пристрою;
- збільшення ремонтпридатності.

Несуча конструкція – це елемент конструкції, чи їх сукупність, призначені для розміщення електричного з'єднання і механічного закріплення радіоелектронних засобів.

Велика різноманітність несучих конструкцій поставила питання про їх оптимізацію і уніфікацію і були створені базові несучі конструкції.

Базова несуча конструкція – конструкція виготовлена для конструювання РЕЗ різного функціонального призначення, що має стандартні габарити та приєднувальні розміри.

Конструювання РЕА здійснюється двома методами: функціонально-вузловим і функціонально-блоковим.

Функціонально-вузловий метод полягає в тому, що конструкцію роздіблюють на функціонально закінчені вузли, які можуть бути окремо спроектовані, виготовлені, налагоджені і випробувані до об'єднання у загальну конструкцію. Даний метод дозволяє звести до мінімуму число зовнішніх з'єднань. Вести паралельне проектування складових частин, організувати одночасне їх виготовлення.

Функціонально-блоковий метод використовується для конструкцій другого і третього рівнів. Пристрої складаються із спеціалізованих блоків, виготовлених на різних підприємствах.

Контрольні питання:

1. За якими ознаками класифікуються радіоелектронні пристрої?
2. Як класифікуються прилади за функціональною ознакою?
3. Як класифікуються пристрої за конструктивною ознакою?
4. Що дає ієрархічний принцип конструювання?
5. Які є види несучих конструкцій?
6. Що відноситься до нульового рівня конструкції?
7. Що таке базова несуча конструкція?
8. Якими методами здійснюється конструювання виробів?
9. Що таке функціонально-вузловий метод конструювання?

5 КОНСТРУЮВАННЯ ВУЗЛА РЕЗ З ДРУКОВАНИМ МОНТАЖЕМ

5.1 Вихідні дані для розробки

Вихідні дані, що визначають конструкцію вузла, формат друкованої плати, спосіб підготовки і установа ЕРЕ, конструкція зовнішніх і контрольних контактів, спосіб кріплення вузла, застосування методів захисту від зовнішніх впливів (амортизація, покриття лаком, екранування та інше):

- схема електрична принципова та перелік елементів до неї, що визначає кількість, типи і режими роботи елементів, їх габарити з урахуванням теплових полів і вимог до внутрішньої електромагнітної сумісності;
- особливості об'єкта установа, що визначає необхідність і ступінь захисту від дестабілізуючих факторів (клімат, мікроклімат, динамічні та теплові вимоги зовнішньої електромагнітної сумісності);
- вимоги, що визначились під час загального компонування, тобто габаритно-масові обмеження і вимоги до технологічності складання, регулювання, експлуатації та ремонту.

5.2 Особливості електромонтажу радіоелектронної апаратури

Конструкції сучасних РЕЗ будуються за принципом послідовного ускладнення шляхом конструктивного об'єднання більш простих вузлів і деталей. Це приводить до утворення конструкторської ієрархії, що об'єднується в єдиний радіоелектронний пристрій за допомогою електромонтажу.

Електромонтажем називається частина конструкції, що призначається для забезпечення електрично-нерозривних зв'язків при об'єднанні декількох елементів нижчого конструкторського рівня в елементи вищого конструкторського рівня. Електромонтаж, як правило, розглядають у двох аспектах: міжконтактна комутація і контактування.

На різних конструкторських рівнях використовують різні способи електромонтажу.

Так, для ІМС (на нульовому конструкторському рівні), використовують плівкову міжконтактну комутацію і нероз'ємне контактування. На нульовому та першому конструкторських рівнях для комутації переважно використовують друкований монтаж, контактування з ЕРЕ паянням або зварюванням, а з іншими вузлами - паянням або роз'ємом. На другому конструкторському рівні (блок, шафа) міжконтактну комутацію частіше всього виконують за допомогою об'ємних провідників, а контактування - паянням, накручуванням, бандажуванням, з'єднувачами.

Використання групових методів виробництва, що дозволяє зменшити вартість, підвищити щільність електромонтажу і його надійність,

зменшити габарити, привело до широкого використання плоскої конструкції електромонтажу (плівкові, багат шарові керамічні структури, друковані плати), але використання плоских конструкцій ускладнює локалізацію паразитних зв'язків екрануванням. Тому при конструюванні ДП необхідно ретельно розраховувати очікувані параметри електромонтажу з точки зору внутрішньої електромагнітної сумісності.

Друкований монтаж має такі переваги:

- високу щільність розміщення провідників, малі габарити і масу;
- малу вартість в масовому виробництві;
- велику механічну міцність і стійкість до кліматичних та теплових дій;
- сумісність з САПР.

Недоліки друкованого монтажу:

- велика тривалість циклу підготовки виробництва;
- принципова неможливість повного екранування;
- обмеженість максимальних габаритів друкованих плат через зменшення їх жорсткості і короблення;
- складність проектування друкованого монтажу на гнучкій основі, погана ремонтпридатність.

5.3 Компонування друкованої плати

5.3.1 Ручний метод конструювання

Ручне конструювання ДП базується на принципах, розглянутих у [20] з використанням практичних рекомендацій і довідкових даних. Порядок його виконання [20]:

- аналізують нарис принципової схеми у випадку необхідності перекреслюють схему для забезпечення простоти рисунка;
- складають варіант принципової схеми з уточненнями типорозмірів ЕРЕ;
- будують потенціальні епюри схеми або встановлюють потенціали різних кіл схеми;
- розраховують потужності теплових втрат ЕРЕ (у випадку необхідності будують термальні епюри);
- групуєть елементи у вигляді конструювального ескіза з урахуванням потенціальних і термальних епюр ЕРЕ та різних варіантів їх взаємного розміщення для кожної функціональної групи;
- принципову схему розбивають на функціональні групи і складають таблицю з'єднань.

Під час конструювання необхідно:

- розмістити всі навісні ЕРЕ з однієї сторони плати;
- раціонально розмістити основні елементи схеми, що мають найбільше число комутаційних вузлів;
- розмістити ЕРЕ паралельно до сторін ДП;
- мікросхеми розмістити рядами;

- забезпечити раціональне взаємне розміщення і мінімальні довжини міжз'єднань;

- розмістити центри всіх монтажних отворів, призначених для установлення виводів ЕРЕ, контактних штирів, а також всіх технологічних і кріпильних отворів у вузлах координатної сітки;

- раціонально розмістити елементи зовнішньої комутації.

Із числа всіх груп елементів вибирається така, що має найбільше число зовнішніх зв'язків і розміщується біля з'єднувача. Із тих, що залишились, вибирається друга група, яка має найбільше число зв'язків зі з'єднувачем та першою групою і т.д. Після розміщення останньої групи, у випадку необхідності, виконується корегування, зокрема, теплонавантажені елементи розміщують біля краю плати поряд з тепловідвідними шинами.

Потім виконується трасування.

Установлення радіоелементів виконують з урахуванням доступу до будь-якого елемента і легкої їх заміни у процесі налаштування, ремонту, можливості ручного або групового паяння з наступним захистом лаковим покриттям.

Відстань від корпусу ЕРЕ до осі вигнутого виводу повинна бути не менше 2,0 мм, а до місця паяння не менше 2,5 мм.

Варіанти формування і установлення елементів повинні відповідати вимогам галузевого стандарту ОСТ 4.010.030-82 "Установка навесных элементов на печатные платы. Конструирование" [13]. Для елементів, які не наведені у стандарті, необхідно використовувати спосіб формування виводів і установлення, обґрунтований технічними вимогами до ЕРЕ.

У конструкціях ДП для кріплення ІС передбачають групи контактних площадок з неметалізованими отворами.

Мікросхеми розміщують на ДП так, щоб їх виводи збігалися з вузлами сітки. Якщо відстані між виводами ЕРЕ не кратні 2,5 або 1,25 мм, ці ЕРЕ розміщують так, щоб один або декілька виводів збігалися з вузлами координатної сітки. Розміщення ІС з планарними виводами визначається їх розміткою на платі. При встановленні ІС на ДП перший вивід необхідно сумістити з першою контактною площадкою групового місця встановлення, що має ключ, нанесений на ДП у вигляді "вусика", квадрата або цифри "1".

На ДП можливе спільне компонування ІС та інших навісних елементів, зокрема контрольних з'єднувачів і контактів, накладок для забезпечення жорсткості, тепловідводів, ручок, елементів індикації. Навісні ЕРЕ за умов одностороннього розміщення елементів встановлюють зі сторони розміщення ІС, при двосторонньому - зі сторони розміщення з'єднувачів або інших елементів електричної комутації. Незадіяні виводи ІС, як правило, необхідно запаювати для забезпечення стійкості конструкції до вібрації та ударів.

Відстань між корпусом ЕРЕ та краєм ДП повинна бути не меншою 1,0 мм, відстань між корпусами ЕРЕ - не меншою 0,5 мм, між корпусами ІС - не меншою 1,5 мм в одному напрямку установлення.

5.3.2 Напіваавтоматизований метод конструювання

Конструювання напіваавтоматизованим методом може бути здійснено двома способами. Перший спосіб включає розміщення елементів на друкованій платі за допомогою ЕОМ та розробку рисунка ДП ручним методом. Другий спосіб включає розміщення елементів на ДП ручним методом та розробку провідного рисунка з допомогою ЕОМ.

Перший спосіб передбачає:

- зняття координат елементів монтажу з ескізу провідного рисунка на координатоскопі і введення на машинний носій;
- введення в машину даних таблиці кіл ДП;
- порівняння даних зняття і таблиці кіл ДП,
- розробку КД з використанням засобів автоматизації.

Другий спосіб передбачає:

- введення в ЕОМ даних ручного розміщення елементів;
- трасування провідників в автоматизованому режимі.

5.3.3. Автоматизований метод конструювання

Автоматизований метод трасування ДП здійснюється з допомогою програм OrCAD та PICAD.

Метод включає такі операції:

- викреслювання схеми електричної принципової;
- формування бази даних радіоелементів;
- розміщення навісних елементів на платі;
- режим трасування друкованих провідників;
- оформлення креслення друкованої плати.

5.4 Конструювання друкованої плати

Терміни і визначення основних і загальних понять ДП встановлені ГОСТ 20406-76 і наведені у [17].

Для повної реалізації переваг друкованого монтажу під час розробки ДП слід дотримуватись таких рекомендацій: передбачити у конструкції виробу багатошарові друковані плати, зменшувати зі збільшенням габаритів плат щільність провідного рисунка.

Найменші номінальні значення основних розмірів елементів конструкції ДП для вузького місця в залежності від класу точності за ГОСТом 23751-86 наведені у таблиці 5.1.

Для широкого місця вказані значення встановлювати за будь-яким більш низьким класом, а для першого класу - збільшити у два рази.

При конструюванні ДП, визначають габарити ДП та необхідну для даного виробу щільність провідного рисунка, вибирають метод виготовлення ДП. Коли вибирають метод враховують електричні

параметри схеми, елементну базу, кліматичні умови, механічні вимоги, забезпечення надійності, умови експлуатації.

Повні знання про матеріали, що використовуються для виготовлення ДП, у тому числі міцність зчеплення фольги з діелектриком у вихідному стані та після різних дій під час експлуатації та при виготовленні, а також електричні характеристики, наведені у [19].

Таблиця 5.1 – Класи точності друкованих плат

Елементи конструкції	Номінальні значення розмірів для класів точності				
	1	2	3	4	5
Ширина друкованого провідника b , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
Відстань між провідниками та контактними площадками, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
Гарантійний пояс c , мм	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
Відношення номінального діаметра найменшого з отворів до товщини плати	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

Характеристики методів та особливостей технологічних процесів виготовлення одно- і двосторонніх плат наведені у [10,14]. Способи виготовлення ДП:

- комбінований позитивний для двосторонніх ДП;
- хімічний для односторонніх ДП;
- металізації наскрізних отворів для БДП.

Перспективними для виробництва ДП є метод адитивний і метод фотоутворення.

При розробленні конструкції необхідно визначити площу плати в залежності від розмірів елементної бази та щільності компонування за формулою

$$S = q \cdot S_{pe}, \quad (5.1)$$

де q – коефіцієнт дезінтеграції, $q = (2 - 4)$;

S_{pe} – площа радіоелементів.

Типорозміри друкованих плат вибираються за ГОСТом 10317-79 (таблиця 5.2)

Розміри кожної сторони повинні бути кратними 2,5 - при довжині до 100 мм; 5,0 - при довжині до 350 мм; 10,0 - при довжині >350 мм.

Максимальний розмір будь-якої із сторін не більше 470 мм. Співвідношення розмірів сторін не більше 3:1.

Рекомендовані співвідношення сторін 1:1, 1:3, 2:3, 2:5.

Габаритні розміри друкованих плат та діаметри отворів повинні бути виконані з допусками за ГОСТом 25347-82 (таблиці 5.2, 5.3).

Граничні відхилення на приєднувальні розміри контура друкованої плати не повинні бути вищі 12 квалітету.

Граничні відхилення на габаритні розміри контура друкованої плати повинні бути не вищі 14 квалітету.

При конструюванні ДП необхідно керуватися такими конструкторсько-технологічними вимогами:

- конструкція ДП повинна мати прямокутну форму. Іншу конфігу-

Таблиця 5.2 - Рекомендовані розміри друкованих плат

Ширина плат	Довжина плат	Ширина плат	Довжина плат
10	10,20	100	100, 120, 140, 160, 180, 200
20	20, 30, 40	120	120, 140, 160, 180, 200, 240
30	30, 40, 50, 60	140	140, 160, 180, 200, 240, 280
40	40, 50, 60, 80	160	160, 180, 200, 240, 280, 320
50	50, 60, 80, 90, 100	180	180, 200, 240, 280, 320, 360
60	60, 80, 90, 120, 140	200	200, 240, 280, 320, 360
80	80, 90, 100, 120, 140, 160	240	240, 280, 320, 380
90	90, 100, 120, 140, 160, 180		

Таблиця 5.3 – Граничні відхилення габаритних розмірів друкованих плат, мкм

	Граничні відхилення для полів допусків			
	h11	H12	H13	H14
від 40 до 50	+0 -160	+0 -160	+0 -390	+0 -620
від 50 до 80	+0 -190	+0 -300	+ 0 -460	+0 -740
від 80 до 120	+0 -220	+0 -350	+0 -540	+0 -870
від 120 до 180	+0 -250	+0 -400	+0 -630	+0 -1000
від 180 до 250	+0 -290	+0 -460	+0 -720	+0 -1150
від 250 до 315	+0 -320	+0 -520	+0 -810	+0 -1320
від 315 до 400	+0 -360	+0 -570	-0 -890	+0 -1400

рацію плат використовують тільки за необхідністю і в технічно обґрунтованих випадках. Для ДП симетричної форми передбачається ключ, за яким плату орієнтують під час складання;

Таблиця 5.4- Граничні відхилення неметалізованих отворів, мкм

Інтервали діаметрів, мм	Граничні відхилення для полів допусків ГОСТ 25377-82							
	H7	K7	N7	H8	H9	H11	H12	H14
від 1 до 3	+10 0	0 -10	-4 -14	+14 0	+25 0	+60 0	+100 0	+250 0
від 3 до 6	+12 0	+3 -9	-4 -16	+18 0	+30 0	+75 0	+120 0	+300 0
від 6 до 10	+15 0	+5 -10	-4 -19	+22 0	+36 0	+90 0	+150 0	+300 0

- рекомендовані товщини плат: $0,8 \pm 0,15$ мм; $1,0 \pm 0,15$ мм; $1,5 \pm 0,15$ мм; $2,0 \pm 0,2$ мм; $3,0 \pm 0,3$ мм. Товщину плат вибирають з урахуванням способу виготовлення, механічних і електричних вимог до конструкції;

- центри отворів розміщують у вузлах координатної сітки. Діаметри монтажних та перехідних неметалізованих і металізованих отворів вибирають за ГОСТом 10317-79 з ряду 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,1; 2,2; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 3,0.

Відстань між центрами отворів на платі потрібно витримувати з допуском не більше $\pm 0,2$ мм, а між центрами взаємозв'язаних отворів під багатовивідні навісні ЕРЕ і при умові автоматизованого установаження ЕРЕ не більше $\pm 0,1$ мм. Отвори на платі необхідно розміщувати таким чином, щоб відстань між краями отворів (без врахування фаски) була не менша товщини плати.

Крок координатної сітки вибирають у відповідності з ГОСТ 10317-79; основний крок - 2,5 мм, решта - 1,25 мм або 0,625 мм.

Особливості конструювання друкованого монтажу розглянуті у [3; 4; 10].

5.5 Розміщення друкованих провідників на платі

Розміщення друкованих провідників, їх ширина і відстань між ними повинні бути виконані у межах заданих допусків і визначені положеннями [16] з урахуванням таких практичних рекомендацій.

Провідники кіл живлення розміщують у першу чергу, а потім провідники заземлення.

Ці провідники повинні мати максимальну ширину, оскільки по них проходять значні струми живлення, що викликають зворотні зв'язки.

При трасуванні рекомендується виконувати всі горизонтальні провідники з однієї сторони плати, а вертикальні з іншої. Перехід з однієї сторони на другу відбувається з допомогою перехідних отворів. Це дозволяє отримати провідники мінімальної довжини, але погіршує технологічні та якісні характеристики ДП.

Екранувати провідники необхідно з допомогою заземленого металевого шару. Ефективність екранування тим вища, чим ближче розміщений до провідника заземлений шар і чим вужчий сам провідник.

Провідники, що закінчуються металізованими отворами для кріплення ЕРЕ, повинні мати навколо отворів розширення - контактну площадку, яка може бути круглою або довільної форми.

При двосторонньому розміщенні друковані провідники не повинні торкатися корпусів ЕРЕ, що лежать на ДП. Якщо це неможливо, елементи слід встановлювати на відстані від поверхні плати. В окремих випадках доцільно розміщувати провідники під елементом (конденсатор, реле, радіатор), але при цьому між елементом і платою обов'язково повинна бути прокладка.

Контактні площадки для ІС з планарними виводами рекомендують виконувати прямокутної форми у вигляді провідників.

На односторонніх і двосторонніх платах на всіх шарах БДП слід витримувати відстані між краєм провідника, контактної площадки, екрана, у тому числі краєм неметалізованого отвору. На краях ДП повинні бути передбачені технологічні зони не менші 1,5-2 мм.

Коли необхідне прокладання провідника завширшки 0,3-0,4 мм, рекомендується через кожні 26-30 мм передбачувати перехідні отвори або місцеві розширення типу контактної площадки з розмірами не меншими 1х1 мм, або іншими співвідношеннями сторін, але при зберіганні площі.

Провідники завширшки більше ніж 5 мм рекомендується виконувати згідно з правилами виконання екранів, тобто з вирізами, які можуть бути прямокутними, овальними, круглими або мати форму сітки. Площа вирізів повинна складати не менше 50% загальної площі екрана. Навколо отвору, електрично зв'язаного з екраном, виконують два-чотири окремі вирізи у формі сектора на відстані 1,0 - 1,5 мм, від краю, а навколо отвору, електрично незв'язаного з екраном, роблять кільцевий виріз на тій же відстані до краю.

5.6 Розрахунок друкованого монтажу

У вузьких місцях діаметр контактної площадки отвору розраховується за формулою:

$$D = d + \Delta d_{\text{вв}} + 2c + 2 \Delta d_{\text{тр}} + \Delta t_{\text{вв}} + (T_D^2 + T_d^2 + \Delta t_{\text{нв}}^2)^{1/2} \quad (5.2)$$

де d - діаметр отвору;

$\Delta d_{\text{вв}}$ - граничне верхнє відхилення діаметра отвору (таблиця 5.5);

c - ширина контактної площадки у вузькому місці (таблиця 5.1);

$\Delta t_{\text{вв}}$ - граничне верхнє відхилення діаметра контактної площадки (таблиця 5.6);

$\Delta d_{\text{тр}}$ - значення підтравлювання діелектрика в отворі (дорівнює 0,03 мм для БДП і нулю для ОДП і ДДП);

T_d - позиційний допуск розміщення осей отворів (таблиця 5.7);

T_D - позиційний допуск розміщення центрів контактних площадок (таблиця 5.8);

$\Delta t_{\text{нв}}$ - граничне нижнє відхилення контактної площадки (таблиця 5.6).

Діаметр отвору визначається в залежності від товщини виводів радіоелементів, $d = d_{\text{в}} + (0,2 - 0,4)$ мм.

Найменша номінальна відстань для прокладання n -ї кількості провідників.

$$l = \frac{D_1 + D_{21}}{2} + b \cdot n + S \cdot (n + 1) + T_e \quad (5.3)$$

де D_1, D_2 - діаметри контактних площадок;

b - ширина друкованого провідника;

n - кількість провідників;

S - відстань між краями сусідніх друкованих провідників;

T_e - позиційний допуск розміщення друкованого провідника (таблиця 5.9).

Таблиця 5.5. - Граничні відхилення діаметра монтажних і перехідних отворів, Δd

Діаметр отвору, мм	Наявність металізації	Граничні відхилення діаметра d , мм				
		1	2	3	4	5
До 1,0 мм	Без металізації	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$
	З металізацією оплавленням	$+0,05;$ $-0,15$	$+0,05;$ $-0,15$	$+0;$ $-0,10$	$+0;$ $-0,10$	$+0;$ $-0,75$
	З металізацією без оплавлення	$+0,05;$ $-0,18$	$+0,05;$ $-0,18$	$+0;$ $-0,13$	$+0;$ $-0,13$	$+0;$ $-0,13$
Вище 1,0 мм	Без металізації	$+0,15$	$+0,15$	$+0,10$	$\pm 0,1$	$\pm 0,10$
	З металізацією оплавленням	$+0,1;$ $-0,2$	$+0,10;$ $-0,20$	$+0,05;$ $-0,15$	$+0,05;$ $-0,15$	$+0,05;$ $-0,15$
	З металізацією без оплавлення	$+0,1;$ $-0,23$	$+0,1;$ $-0,23$	$+0,05;$ $-0,18$	$+0,05;$ $-0,18$	$+0,05;$ $-0,18$

Таблиця 5.6 - Граничні відхилення діаметра контактної площадки, Δt

Наявність металізації отвору	Граничні відхилення ширини друкованого провідника, мм, для класу точності				
	1	2	3	4	5
Без покриття	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$	+0 -0,03
З покриттям	+0,25 -0,20	+0,15 - 0,1	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$

Таблиця 5.7. - Позиційні допуски розміщення осей отворів, T_d

Розмір ДП по більшій стороні, мм	Значення позиційного допуску розміщення осей отворів T_d , мм				
	1	2	3	4	5
До 180 включ.	$\pm 0,20$	$\pm 0,15$	$\pm 0,08$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
Від 180 до 300	$\pm 0,25$	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$	$\pm 0,08$	$\pm 0,08$
Вище 360	$\pm 0,30$	$\pm 0,25$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,1$

Таблиця 5.8. - Значення позиційних допусків розміщення центрів КП, T_D

Вид виробу	Розмір ДП по більшій стороні	Значення позиційного допуску розміщення центрів КП, T_D , мм (для класів точності)				
		1	2	3	4	5
ОДП, ДДП, БДП (зовнішній шар)	До 180 включ.	$\pm 0,35$	$\pm 0,25$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$
	Від 180 до 360	$\pm 0,40$	$\pm 0,30$	$\pm 0,20$	$\pm 0,15$	$\pm 0,08$
	Більше 360	$\pm 0,45$	$\pm 0,35$	$\pm 0,25$	$\pm 0,20$	$\pm 0,15$
БДП (внутрішній шар)	До 180 включ.	$\pm 0,40$	$\pm 0,30$	$\pm 0,20$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$
	Від 180 до 360	$\pm 0,45$	$\pm 0,35$	$\pm 0,25$	$\pm 0,20$	$\pm 0,15$
	Більше 360	$\pm 0,50$	$\pm 0,40$	$\pm 0,30$	$\pm 0,25$	$\pm 0,20$

5.7 Розрахунок ширини друкованих провідників

Визначаємо мінімальну ширину друкованого провідника в залежності від величини струму у колі

$$b_{\min 1} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{доп}} \cdot t} \quad (5.4)$$

де - $I_{\max}$ - максимальний постійний струм, що проходить у провіднику (визначається із аналізу схеми принципової), А;

$j_{\text{доп}}$ - допустима густина струму (таблиця 5.9), А/мм²

t - товщина провідника, мм.

Таблиця 5.9 - Значення позиційних допусків розміщення друкованого провідника відносно сусіднього елемента, Те

Вид виробу	Значення позиційного допуску розміщення друкованого провідника, мм (для класів точності)				
	1	2	3	4	5
ОДП, ДДП, БДП (зовнішній	0,20	0,10	0,05	0,03	0,02
БДП (внутрішній шар)	0,3	0,15	0,10	0,08	0,05

Визначаємо мінімальну ширину провідника з умови допустимого спаду напруги

$$b_{\min 2} = \frac{\rho \cdot I_{\max} \cdot l}{\Delta U_{\text{доп}} \cdot t} \quad (5.5)$$

де ρ - питомий опір матеріалу провідника, Ом · мм² / м (таблиця 5.10);

l - довжина провідника, м;

t - товщина провідника, мм;

$\Delta U_{\text{доп}}$ - допустимий спад напруги, який не перевищує 5% від напруги живлення мікросхем та не більший завадостійкості мікросхем.

Таблиця 5.10 - Допустима густина струму в залежності від методу виготовлення

Метод виготовлення	Товщина фольги, мкм	Допустима густина струму, А/мм ²	Питомий опір, Ом · мм ² / м
Хімічний: внутрішні шари БДП зовнішні шари ОДП, ДДП	20, 35, 50	15	0,050
	20, 35, 50	20	
Комбінований позитивний	20	75	0,0175
	35	48	
	50	38	
Електрохімічний	—	25	0,050

Мінімальні значення ширини провідників необхідно порівняти з технологічно можливою шириною, яка відповідає прийнятому класу точності і вибрати максимальну.

5.8 Особливості конструювання друкованих плат

При виготовленні плат хімічним методом монтажні отвори повинні мати zenківки. Допускається zenкування монтажних отворів зі сторони

установлення ЕРЕ, що мають виводи у вигляді штирів. Інші отвори можуть мати зенкування з двох сторін.

Діаметр монтажних отворів, в які ставляться пустотілі заклепки, наприклад, для зовнішніх виводів, для масивних ЕРЕ або для ЕРЕ що підбираються під час регулювання, вибирається з умови:

$$d = d_3 + 0,1 \text{ мм}$$

Діаметр контактної площадки може бути зменшений з однієї сторони, або з двох сторін до значень s , що подаються у таблиці 5.1. У випадку зменшення з однієї сторони, контактну площадку збільшують у вільну сторону з тим, щоб її площа, без урахування площі отвору, складала 4-6 мм².

При виготовленні плат комбінованим методом металізовані отвори виконують як із зенкуванням, так і без нього. При наявності зенкування отворів допускається для позитивного методу заниження контактної площадки до зенкування з однієї або з двох сторін; для негативного методу - заниження контактної площадки до 0,15 мм, починаючи від краю зенкування. При відсутності зенкування заниження контактної площадки допускається до значень s , що вказані у таблиці 5.1.

При виготовленні друкованих плат необхідно виконати захист провідників від впливу навколишнього середовища за допомогою захисних лаків або масок. Застосування масок дозволяє виконувати маркування радіоелементів на поверхні плати. Маркування виконується фарбою у довільній формі, яке вміщує графічне та літерне позначення радіоелементів.

5.9 Розробка конструкторської документації на друковані вузли

Конструкторська документація на друковані вузли вміщує креслення друкованої плати як деталі, складальне креслення вузла плати та специфікацію.

5.9.1 Розробка креслення друкованої плати

5.9.1.1 Методика розробки креслення друкованої плати

Креслення ДП виконують і оформляють у відповідності до вимог стандартів ГОСТ 2.109-73 і ГОСТ 2.417-78 у масштабі - 1:1; 2:1; 4:1; 5:1; 10:1. Для кроку координатної сітки 1,25 мм рекомендують масштаб 2:1. Креслення повинно вміщувати види плати з друкованими провідниками і отворами, розміри для механічної обробки, технічні вимоги і виконується у такій послідовності:

- на листі стандартного формату накреслити рамку, контури видів у масштабі 2:1 і основний напис. Передбачити місце для технічних вимог, таблиці отворів, таблиці параметрів елементів друкованого монтажу;

- накреслити контур плати. Нанести габаритні розміри з граничними допусками. Правила нанесення розмірів і граничних відхилень на кресленнях встановлені стандартом ГОСТ 2.307-68. Нанести прямокутну

координатну сітку з кроком 2,5 мм. Сітка визначає положення контактних площадок і монтажних отворів, а також друкованих провідників та інших елементів, виконується лініями типу виносних;

- пронумерувати лінії координатної сітки, вважаючи за початок координат центр крайнього лівого нижнього отвору зі сторони друкованого монтажу або кутку плати. Координатну сітку нумерують через два кроки;

- накреслити кріпильні отвори, нанести приєднувальні розміри, відстань між осями, координату лівого нижнього отвору, а також розміри ключа, що визначає орієнтацію ДП при складанні;

- нанести контактні і монтажні отвори у відповідності з компоновальним ескізом і вибраним масштабом. Отвори, близькі за діаметром рекомендується зображати колом одного діаметра з використанням умовного позначення діаметра;

- умовне позначення отворів, їх діаметри (з граничними допусками), наявність металізації, діаметри контактних площадок, кількість отворів занести у таблицю;

- центри монтажних і перехідних отворів повинні розміщуватися у вузлах координатної сітки, у тому числі і центри отворів під ключові виводи багатоконтактних навісних елементів, які не підлягають додатковому формуванню і не кратні кроку координатної сітки. Такі ділянки ДП, а також місця посадки і групові контактні площадки під 1С на кресленнях ДП обводять контуром, від якого роблять виноску з римською цифрою. На полі креслення розміщують виносний елемент у тому ж або збільшеному масштабі з координатами всіх отворів і провідників цього елемента;

- круглі контактні площадки отворів допускається позначати одним колом, діаметр якого відповідає мінімальному розміру контактної площадки. Форма і розміри обумовлюються у технічних вимогах або у таблиці;

- провідники зображають у вигляді відрізків, проведених паралельно лініям координатної сітки або під кутом 45° . Провідники, ширина яких на кресленні менше 2 мм, рекомендується виконувати суцільною лінією, яка приблизно дорівнює двом товщинам контурних ліній. Широкі провідники, екрани, контактні площадки необхідно штрихувати під кутом 45° . Якщо на кресленні є провідники, які за розрахунком повинні мати певну ширину та форму, то на кресленні необхідно подати їх розміри;

- за необхідністю в технічних вимогах подати інформацію про наявність захисної маски;

Всі ЕРЕ, позначення виводів напівпровідникових приладів (К,Е,Б), полярність електролітичних конденсаторів ("+"), базового виводу мікросхем, нумерацію вхідних та вихідних виводів необхідно маркувати. Маркування виконується способом друкованого монтажу або фарбою;

- праворуч, у верхньому кутку креслення, нанести позначення жорсткості для сторін та отворів, вибір класу чистоти; нанесення позначення жорсткості поверхні провести у відповідності зі стандартами ГОСТ 2.309-73 і ГОСТ 2789-73;

- вказати технічні вимоги;
- виконати основний напис.

5.8.1.2 Основні вимоги до оформлення креслення

Креслення одно- і двосторонньої ДП має найменування "Плата". У графі основного напису дають позначення матеріалу, наприклад "Склотекстоліт СФ-1-50-1,5 ГОСТ 10316-78".

Трудомісткість креслень ДП для складної РЕА може бути знижена розробкою на групу однотипних за типорозміром і технологією виготовлення ДП єдиного базового креслення, у якому вказують всі необхідні розміри, допуски, обробки, загальні технічні вимоги. Тоді креслення на кожну плату зводиться до показу тільки трас друкованих провідників і посилання на базове креслення.

5.8.1.3 Запис технічних вимог

Технічні вимоги на кресленні ДП повинні бути сформульовані за такою формою:

1. Розміри для довідок.
2. Плату виконати ... (вказати вибраний метод).
3. Плата повинна відповідати.... (вказати ГОСТ).
4. Крок координатної сітки...(вказати крок сітки, наприклад, $2,5 \pm 0,1\text{мм}$).
5. Вимоги до параметрів елементів друкованого монтажу пропонується подати у вигляді таблиці.
6. Форма контактної площадки довільна, $s=0,2\text{ мм}$ (у відповідності з класом ДП за щільністю монтажу).
7. Граничні відхилення між центрами контактних площадок ... (вказати відхилення).
8. На поверхню плати, зі сторони провідників, нанести захисну маску.
9. Позиційні позначення елементів маркувати фарбою... (вказати тип), шрифтом...
10. Друковані провідники і контактні площадки не захищені маскою покрити сплавом "РОЗЕ".
11. Заводський номер та дату виготовлення маркувати фарбою... (вказати тип), шрифтом... (вказати розмір).

Редакція пунктів технічних вимог може бути змінена у залежності від конструктивних особливостей ДП.

5.9.2 Розробка складального креслення друкованої плати

5.9.2.1 Зміст і позначення складального креслення

Складальне креслення - документ, що вміщує зображення складальної одиниці і інші дані, необхідні для її складання (виготовлення), контролю.

Такими даними є:

- зображення складальної одиниці, що дає уявлення про розміщення та взаємний зв'язок складових частин, які з'єднуються за даним кресленням;
- відомості для забезпечення складання і контролю складальної одиниці;
- розміри, їх відхилення та інші параметри і вимоги, які повинні бути проконтрольовані за складальним кресленням;
- зазначення про характер та методи з'єднання деталей;
- зазначення про спосіб виконання нерознімних з'єднань (зварювання, паяння);
- номер позицій складових частин блока за специфікацією;
- основні характеристики виробу (за умов необхідності);
- габаритні та приєднувальні довідкові розміри.

Основний напис складального креслення повинен бути виконаний за стандартом ГОСТ 2.104 - 68. Найменування виробу і позначення повинно бути однаковим для схеми електричної принципової, переліку елементів, специфікації і складального креслення.

5.9.2.2 Методика розробки складального креслення

Складальне креслення повинно вміщувати дві проекції вузла з електрорадіoeлементами, які виконані зі спрощенням графіки.

Послідовність розробки:

- вибрати масштаб, накреслити рамку, обрис проекцій і основного напису, передбачити місце для технічних вимог над основним написом;
- накреслити проекції ЕРЕ у відповідності з компонованням ДП із спрощенням. Якщо радіoelementи мають оригінальне установлення, то необхідно викреслити додаткові види на вільному полі креслення [21];
- нанести габаритні, установлювальні, додаткові розміри;
- скласти специфікацію, позиційні позначення ЕРЕ за схемою будуть записані у графі "Примітка";
- написати технічні вимоги згідно з рекомендаціями [11].

5.9.2.3 Спрощення у складальному кресленні

Дозволяється складальне креслення оформлювати з деякими спрощеннями:

- друкований монтаж ДП не показувати;
- кріпильні отвори однакового діаметра показувати перетином ліній координатної сітки;
- елементи на боковій проекції плати допускається показувати загальним контуром за максимальним габаритним розміром;

- ЕРЕ викреслювати умовно, у спрощеному вигляді з урахуванням габаритних розмірів у масштабі складального креслення;
- позиційне позначення ЕРЕ показувати виносними лініями;
- використовувати позиційне позначення ЕРЕ замість позицій складального креслення;
- спрощено або умовно показувати кріпильні деталі [21].

5.8.2.4 Технічні вимоги

Технічні вимоги складального креслення повинні вміщувати:

- позначення розмірів для довідок;
- варіанти установлення ЕРЕ;
- заходи електроізоляційного захисту і додаткове кріплення електро-радіоелементів;
- спосіб складання, марку припою;
- технічні вимоги до монтажу;
- відповідність позиційних позначень схемі електричній принциповій;
- спосіб вологозахисту вузла;
- місце для таврування вузла;

5.92.5 Специфікація

У відповідності зі стандартом ГОСТ 2.108-68 до складального креслення додається специфікація, яка виконується на окремих листах формату А4. При великій кількості складових частин виробу специфікація може розміщуватися на декількох листах, у нижній частині кожного повинен бути основний напис відповідно до стандарту ГОСТ 2.104-68 (додаток Б).

Складові частини виробу і КД вносяться у специфікацію у відповідні розділи, які розміщуються у послідовності:

- документація: складальне креслення, схема електрична принципова, перелік документів, пояснювальна записка;
- складальні одиниці: вносяться складальні одиниці, для яких виконані креслення;
- деталі: плата друкована, деталі кріплення, радіатори та інші;
- стандартні вироби: за ГОСТ, ОСТ;
- інші вироби: за ТУ, каталогом, прейскурантом;
- матеріали.

Найменування розділів підкреслюють і відокремлюють вільними рядками. Пропонується резервувати рядки і номери позицій.

Запис розділів "Складальні одиниці" і "Деталі" виконують у порядку зростання номерів позначень.

Запис розділів "Стандартні вироби" виконують за групами виробів, а у межах груп в алфавітному порядку найменувань; у межах найменувань; у порядку зростання стандартів; у межах кожного позначення стандарту - у порядку зростання основних параметрів.

Запис "Інші вироби" виконують за групами в алфавітному порядку найменувань, а у межах найменувань - за номіналами.

Приклад запису розділу "Матеріали" наведені у [27].

Контрольні питання:

1. Якими методами конструюють друковані плати?
2. Як розрахувати діаметри контактних площадок?
3. За якими параметрами розраховують ширину провідників друкованої плати?
4. Якими методами виготовляють друковані плати?
5. Як класифікуються за структурою друковані плати?
6. Яке обмеження за кількістю шарів існує для багатошарових склотекстолітових плат?
7. Які матеріали використовуються для друкованих плат?
8. Наведіть переваги друкованого монтажу.
9. За яким стандартом установлюють радіоелементи?
10. Скільки класів точності існує для друкованих плат?
11. Як вибирають типорозміри друкованих блоків?
12. Які співвідношення сторін плат використовують при конструюванні?
13. Які кроки координатної сітки вибирають при конструюванні друкованих плат?
14. Наведіть приклади оптимальної товщини друкованих плат.
15. Як підвищити ефективність екранування провідників плати?
16. Як виконують провідники шириною більше 5 мм?
17. Що включають технічні вимоги на кресленні друкованої плати?
18. Які спрощення допускаються при оформленні складального креслення друкованої плати?
19. В який розділ специфікації на складальне креслення друкованої плати вносять елементну базу?

6 ЗАХИСТ КОНСТРУКЦІЙ РЕА ВІД МЕХАНІЧНИХ ДІЙ

6.1 Поняття вібростійкості і віброміцності

Всі види РЕА зазнають дії зовнішніх механічних навантажень, які передаються до кожної деталі, що входить у склад конструкції.

Розрізняють два поняття: вібраційна стійкість і вібраційна міцність. Вібраційна стійкість це властивість об'єкта при заданій міцності виконувати задані функції і зберігати значення своїх параметрів у межах норми. Вібраційна міцність це збереження конструкції від руйнування при дії дестабілізуючих факторів. До зовнішніх механічних факторів відносять: вібрацію, удари, лінійні прискорення, перевантаження. Під час розроблювання конструкції необхідно забезпечити задану жорсткість і механічну міцність її елементів.

Методика конструювання РЕА з урахуванням механічних навантажень має такі етапи:

- забезпечення власної жорсткості і міцності конструкції, але це призводить до нарощування маси пристроїв і відповідно до зростання динамічних навантажень;
- визначення власної резонансної частоти конструкції і виведення її з спектра діючих зовнішніх механічних частот конструктивними методами;
- перевірка захищеності РЕА від дії ударних імпульсів заданої форми і тривалості;
- перевірка стійкості конструкції до лінійних перевантажень;
- захист РЕА при транспортуванні з допомогою відповідної упаковки.

6.2 Розрахунок на дію вібрацій

Визначаємо частоту власних коливань окремих конструктивних елементів РЕА. Частоту власних коливань рівномірно навантаженої плати закріпленої в чотирьох точках визначаємо за формулою.

$$f_0 = \frac{\pi}{2a^2} \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{M}} a \cdot b \quad (6.1)$$

де a і b – довжина і ширина плати, м;

M – маса плати, кг;

D – циліндрична жорсткість

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (6.2)$$

де E - модуль пружності (таблиця 6.1);

h - товщина пластини;

ν - коефіцієнт Пуассона (таблиця 6.1);

Таблиця 6.1 - Характеристика матеріалів, що застосовуються в РЕА

Матеріал	$E \cdot 10^{12}$, Н/м	ν	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ²	$\Lambda \cdot 10^2$
Склотекстоліт фольгований СФ	3,02	0,22	2,05	2—10
Сталь	22	0,3	7,8	—
Алюміній	7,3	0,3	3,7	—

Отримане значення частоти власних коливань необхідно порівняти з частотою за умов експлуатації. Якщо виконується умова $f_0 \neq f_p$, то на конструкцію плати не будуть впливати вібраційні навантаження, а якщо дана умова не виконується, то необхідно перейти на інші методи конструювання (зміна розмірів, методів кріплення, маси).

Далі необхідно визначити коефіцієнт динамічності, який розраховується за формулою 6.3.

Таблиця 6.2 - Допустимі стріли прогину фольгованих матеріалів

Товщина листа, мм	Допустима стріла прогину мм/м			
	Одностороннє фольгування		Двостороннє фольгування	
	Гетинакс	Склотекстоліт	Гетинакс	Склотекстоліт
0,8	109	109	55	22
1,0	109	109	55	22
1,5	55	30	27	11
2,0	40	25	20	11
2,5	30	15	15	11
3,0	30	15	15	11

$$K_{дин} = \frac{\sqrt{(1 + [K_1(x)K_1(y) - 1]\eta^2)^2 + \varepsilon^2\eta^2}}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2\eta^2}} \quad (6.3)$$

де $K_1(x)$, $K_1(y)$ – коефіцієнти форми коливань в залежності від методу кріплення країв плати. Для наведених вище випадків кріплення $K(x) = K(y) = 1,3$;

η – коефіцієнт розстроювання;

ε – показник затухання.

Коефіцієнт розстроювання визначається як відношення частоти збудження до частоти власних коливань, $\eta = f / f_0$.

Показник затухання визначається за формулою $\varepsilon = \Lambda / \pi$, де Λ – декремент затухання (таблиця 6.1).

Визначаємо віброприскорення і віброзміщення елементів РЕА.

Для механічної системи з одним ступенем вільності розрахунок амплітуд віброприскорення a_0 і віброзміщення S_b виконуються за формулами:

- для силового збудження:

$$a_g = n_0 \cdot K_{\text{дин}} g \quad (6.4)$$

$$S_g = \frac{n_0 K_{\text{дин}} g}{4\pi^2 f^2} \quad (6.5)$$

- для кінематичного збудження:

$$a_g = 4\pi^2 f^2 \xi_0 K_{\text{дин}} = a_0 \kappa_{\text{дин}} \quad (6.6)$$

$$S_b = \xi_0 K_{\text{дин}} \quad (6.7)$$

де $\xi_0 = a_0 / 4\pi^2 f^2$ - амплітуда віброзміщення основи

Визначаємо максимальний прогин плати відносно її кінців. Для силового збудження:

$$\delta = S_b \quad (6.8)$$

Для кінематичного збудження:

$$\delta = S_b - \xi_0 \quad (6.9)$$

Перевіряємо виконання умов віброміцності. Оцінювання віброміцності виконується за такими критеріями:

- для ІС, транзисторів, резисторів і інших ЕРЕ амплітуда віброприскорення повинна бути меншою допустимих прискорень, тобто $a_{0\text{max}} \prec a_{\text{дон}}$; значення $a_{\text{дон}}$ визначається в процесі аналізу елементної бази;

- для друкованої плати стріла прогину не повинна перевищувати величини δ_1 , яка підраховується за формулою $\delta_1 = \delta_{\text{дон}} \cdot l$, де $\delta_{\text{дон}}$ - допустимий розмір стріли прогину на довжині 1м (таблиця 6.2), l – довжина плати в м;

- для друкованої плати з радіoeлементами повинна виконуватись умова $\delta_b < 0,003b$, де b – розмір сторони плати, паралельно якій встановлені елементи.

У тому випадку, коли умови віброміцності не виконуються, необхідно змінити конструкцію РЕА, збільшивши жорсткість несучих елементів, або застосувати амортизацію.

6.3 Розрахунок на дію удару

Ударні дії характеризуються формою і параметрами ударного імпульсу. Максимальну дію на механічну систему чинить імпульс прямокутної форми. Розрахунок на дію удару проводиться у такій послідовності:

- визначаємо умовну частоту ударного імпульсу

$$\omega = \pi / \tau \quad (6.10)$$

де τ – тривалість ударного імпульсу.

- визначаємо коефіцієнт передачі при ударі для прямокутного імпульсу (формула 6.13) і для півсинусоїдного імпульсу (формула 6.14).

$$K_y = 2 \sin \frac{\pi}{2\nu} \quad (6.11)$$

$$K_y = \frac{2\nu}{\nu^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\nu} \quad (6.12)$$

де ν - коефіцієнт розстроювання, $\nu = \omega / 2\pi f_0$; f_0 – частота власних коливань механічної системи;

- визначаємо максимальне відносне зміщення для прямокутного імпульсу (формула 6.13) і для півсинусоїдного (формула 6.14):

$$Z_{\max} = \frac{2H_y}{2\pi f_0} \sin \frac{\pi}{2\nu} \quad (6.13)$$

$$Z_{\max} = \frac{2H_y}{2\pi f_0} \cdot \frac{\nu}{\nu^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\nu} \quad (6.14)$$

Перевіряємо виконання умов ударостійкості за такими критеріями:

- для ЕРЕ ударне прискорення повинно бути менше допустимого, $a_y < a_{\text{удоп}}$, де $a_{\text{удоп}}$ визначається із аналізу елементної бази;

- для друкованої плати повинна виконуватись умова $Z_{\max} < \delta_{\text{доп}} \cdot l^2$, де $\delta_{\text{доп}}$ визначається з таблиці 6.2;

- для друкованої плати з радіoeлементами $Z_{\max} < 0,003 b$, де b – розмір сторони плати, паралельно якій встановлені радіoeлементи.

Окремим випадком ударної дії є удар при падінні пристрою. Навантаження, яке діє при цьому, становитиме:

$$V_o = V_y + V_b, \quad (6.15)$$

де $V_y = \sqrt{2gH}$ - швидкість пристрою у момент удару;

$V_b = V_y \cdot K_b$ – швидкість відскакування;

H – висота падіння пристрою, м;

K_b – коефіцієнт відновлення швидкості (таблиця 6.3)

Після цього знаходимо прискорення, яке діє на пристрій:

$$a_n = V_o 2\pi f_0, \quad (6.16)$$

Це прискорення повинно бути менше допустимого прискорення падіння за технічним завданням.

У тому випадку, коли умови віброміцності при падінні не виконуються, необхідно змінити конструкцію радіоелектронного засобу, збільшивши жорсткість несучих елементів, або застосувати амортизацію.

Таблиця 6.3 – Коефіцієнт відновлення швидкості

Матеріали тіл, що ударяються	K_b
Сталь – сталь	0,94
Сталь – бетон	0,9
Сталь – земля	0,68
Сталь – пінопласт	0,55

Контрольні питання:

1. Які механічні впливи можуть зазнавати РЕА?
2. За якою формулою розраховується власна частота коливань пристрою?
3. Яка необхідна умова повинна зберігатися для уникнення механічного резонансу?
4. Як визначити допустимий прогин друкованої плати?
5. Який основний критерій використовується для розрахунку плати на віброприскорення?
6. Охарактеризуйте послідовність розрахунку пристроїв РЕА на дію удару.

7 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ. МЕТОДИ ЕКРАНУВАННЯ

Важливим елементом конструкторського проектування електронних засобів є розрахунок внутрішньої електромагнітної сумісності, мета якого - це визначення роботоздатності вузлів в умовах перехресних завад у лініях зв'язку. У результаті розрахунку виявляються елементи і кола, що не забезпечують вимог ЕМС, тому необхідно внести корекції у компоновання, трасування і технологію виготовлення елементів друкованого монтажу та екранування окремих кіл та вузлів.

7.1 Оцінювання завадостійкості

Для оцінювання завадостійкості на друкованій платі визначаємо ємнісну та індуктивну складову паразитного зв'язку, які залежать від паразитної ємності між друкованими провідниками та паразитної взаємоіндукції між ними.

Паразитна ємність між двома друкованими провідниками

$$C = C_{\text{пог}} \cdot l_1 \quad (7.1)$$

де l_1 – довжина взаємного перекриття провідників, см;

$C_{\text{пог}}$ – погонна ємність між двома провідниками (таблиця 7.1, 7.2), пФ/см.

Паразитна ємність провідника в системі з трьох і більше провідників визначається як сума паразитних ємностей пар провідників.

Паразитна взаємоіндукція між друкованими провідниками для плати з неекранованою поверхнею (рисунок 7.1, а) визначається за формулою

$$M = 2l_2 \left[\ln \frac{2l_2}{S + 0,5(b_1 + b_2)} - 1 \right] \quad (7.2)$$

де M – взаємоіндукція між провідниками, мГн;

b_1, b_2 - ширина друкованих провідників, см;

l_2 – довжина паралельної частини провідників, см;

S – відстань між провідниками.

Паразитна взаємоіндукція між друкованими провідниками для плати з екранованою площиною (рисунок 7.1, б) визначається за формулою

$$M = 2l_2 \left[\frac{S + 0,5(b_1 + b_2)}{H} + \ln \frac{2l_2}{S + 0,5(b_1 + b_2)} \right], \quad (7.3)$$

де H – товщина діелектрика, см.

Індуктивність друкованого провідника

$$L = L_{\text{пог}} \cdot l_2 \quad (7.4)$$

де $L_{\text{пог}}$ – погонна індуктивність друкованого провідника, мкГн, (таблиця 7.3).

Призначення перевіркового розрахунку завадостійкості друкованих плат полягає у визначенні допустимих значень паразитних ємностей та індуктивностей або допустимих значень довжин провідників.

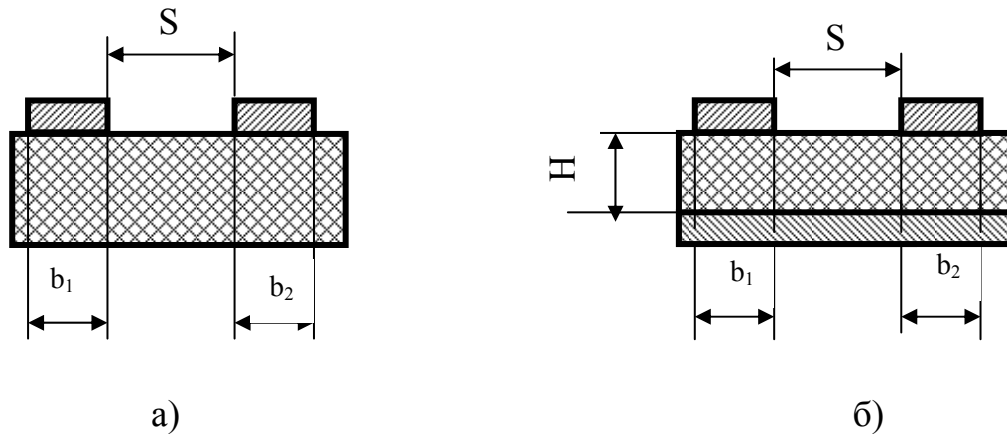


Рисунок 7.1 – Паралельно розміщені провідники; а – без екранування, б – з екранованою площиною

Таблиця 7.1 – Погонні ємності для провідників, розміщених один під одним.

Ширина провідника, мм	Двостороння друкована плата	БДП з товщиною ізоляційного шару, мм		
		0,15	0,25	0,5
0,25	0,54	1,4	1,05	0,75
0,45	0,66	2,19	1,62	1,05
0,75	0,9	3,9	2,25	1,62
1,0	0,96	-	2,76	1,86
1,5	1,2	-	-	2,28
2,0	1,6	-	-	2,76
5,0	2,6	-	-	-

Таблиця 7.2 – Погонні ємності для сусідніх друкованих провідників, розміщених на одному шарі, пФ/см.

Ширина провідника, мм	Відстань між провідниками, мм	Двосторонні плати		Внутрішні шари БДП
		нелаковані	лаковані	
1	2	3	4	5
0,25	0,25	0,53	0,75	0,9

Продовження таблиці 7.2

1	2	3	4	5
0,25	0,45	0,42	0,6	0,72
0,25	0,75	0,35	0,5	0,6
0,45	0,25	0,59	0,85	1,02
0,45	0,45	0,53	0,75	0,9
0,45	0,75	0,42	0,6	0,72
0,45	1,0	0,45	0,65	0,78
0,45	1,5	0,35	0,5	0,6
0,75	0,25	0,77	1,1	1,32
0,75	0,45	0,51	0,9	1,08
0,75	0,75	0,53	0,75	0,9
0,75	1,0	0,52	0,7	0,84
0,75	1,5	0,42	0,6	0,72

Таблиця 7.3 – Погонна індуктивність друкованого монтажу

Ширина провідника, мм	Погонна індуктивність, мкГн
0,25	0,018
0,45	0,017
0,75	0,015
1	0,014
1,5	0,012
2	0,011
2,5	0,0105
3	0,010
4	0,0095
5	0,009

Допустима довжина провідників цифрових схем у випадку дії паразитного зв'язку ємнісного характеру дорівнює

$$l_{\text{доп}} = \frac{\tau_{\text{ф}} \kappa_{\text{ном}} \lg 2S / (t + b)}{0,12 \varepsilon_r R_{\text{вих}}} 10^{12} \quad (7.5)$$

де $l_{\text{доп}}$ – допустима довжина провідника при дії ємнісної складової паразитного зв'язку, см ;

$\tau_{\text{ф}}$ – тривалість фронту імпульсу;

$\kappa_{\text{зав}}$ – коефіцієнт завадостійкості мікросхем;

S – відстань між провідниками;

t – товщина провідника, см;

b – ширина провідника, см;

ε_r – діелектрична проникність середовища між провідниками;

$R_{\text{вих}}$ – вихідний опір, Ом

Допустиму довжину провідників при дії паразитної ємнісної складової можна знайти також як

$$l_{\text{с доп}} = C_{\text{доп}} / C_{\text{пог}}, \quad (7.6)$$

де $C_{\text{доп}}$ – допустиме значення паразитної ємності. Для мікросхем різної серії і тривалості імпульсу сигналу порядку $5t_{\text{зт. р. ср.}}$, де $t_{\text{зт. р. ср}}$ – середній час затримки розповсюдження сигналу, $C_{\text{доп}} = 20 - 80$ пФ.

Для аналогових схем допустима паразитна ємність визначається як

$$C_{\text{доп}} = \frac{K_{\text{звдоп}}}{2\pi f R_i} \quad (7.7)$$

де $K_{\text{звдоп}}$ – допустимий коефіцієнт передачі кола загального паразитного зворотного зв'язку;

R_i – опір джерела сигналу.

Допустима довжина провідників при дії тільки індуктивного паразитного зв'язку цифрових схем визначається за формулою 7.8 для плат з неекранованою поверхнею і за формулою 7.9 для плат з поверхнею екранування.

$$\left[\ln \frac{2l_{\text{доп}}}{S + 0,5(b_1 + b_2)} - 1 \right] = \frac{t_{\text{зм.сеп}}(U_{\text{зсм}} + U_0)}{k_{\text{зан}} \Delta I} \quad (7.8)$$

$$\left[\frac{S + 0,5(b_1 + b_2)}{2H} + \ln \frac{2l_{\text{доп}}}{S + 0,5(b_1 + b_2)} - 1 \right] = \frac{t_{\text{зм.сеп}}(U_{\text{зсм}} + U_0)}{k_{\text{зан}} \Delta I} \quad (7.9)$$

де $U_{\text{зст}}$ – значення завадостійкості мікросхем наведені в ТУ, В;

U_0 – напруга логічного нуля наведена в ТУ, В;

$K_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу, $K_{\text{зап}} = 0,5 - 1$;

ΔI – перепад струму у колі живлення при перемиканні мікросхем,

А;

$t_{\text{зт. ср}}$ – середній час затримки.

Для аналогових схем допустима довжина провідників визначається відношенням, $l_{\text{доп}} = L_{\text{доп}} / L_{\text{пог}}$.

Допустиме значення індуктивності визначається за формулою

$$L_{\text{доп}} = \frac{K_{\text{з.зв.доп}} R_n}{2\pi f} \quad (7.10)$$

де R_n – опір навантаження.

Допустима довжина провідників на друкованій платі при одночасній дії ємнісного та індуктивного паразитного зв'язку визначається за формулою

$$l_{\text{доп}} = \frac{l_{\text{Cдоп}} \cdot l_{\text{Mдоп}}}{l_{\text{Cдоп}} + l_{\text{Mдоп}}} \quad (7.11)$$

При компонованні плат слід враховувати, що ділянки схем з великим опором чутливі до впливу паразитних ємностей, для ділянок з малим опором більш важливі опір та індуктивність провідників. Тому у високоомних колах слід застосовувати вузькі провідники, при цьому паразитна ємність буде мінімальною. Для низькоомних сигнальних кіл застосовують широкі провідники, при цьому опір і індуктивність мінімальні, а ємності не суттєві.

В цілому взаємне розміщення провідників і компонентів повинні бути такими, щоб ємності між ними в основному опинялись у ділянках схеми, де вплив цих ємностей на роботу схеми мінімальний, вхідні, чутливі до наведення ділянки схеми слід екранувати від інших ділянок з високим рівнем сигналів.

7.2 Розрахунок електромагнітного екранування

Екранування є конструкторським способом послаблення електромагнітного поля завад в межах певного простору і призначено для підвищення завадостійкості та забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів та систем. Конструкції, які реалізують вказані вимоги, називаються екранами. Екрани застосовуються як для окремих елементів, так і для цілих вузлів та пристроїв. Необхідність екранування повинна бути обґрунтована і розглядатися тільки після того, як повністю вичерпані конструктивні методи оптимального компоновання апаратури.

На практиці дію екрана оцінюють ефективністю екранування

$$E = 20 \lg(U/U_{\text{н}}) \quad (7.12)$$

де U – напруга завади в екранному просторі, В;

$U_{\text{н}}$ – напруга завади без екрана.

Розрахунок екранів проводиться у такій послідовності:

- визначається тип поля завади, яке класифікується як електростатичне, магнітостатичне та електромагнітне. Простір навколо умовного випромінювача електромагнітної завади поділяється на ближню ($r < \lambda / 2\pi$) та дальню ($r > \lambda / 2\pi$) зони, де λ - довжина хвилі завади, r – відстань від випромінювача до екрана. Якщо випромінювач уявити у вигляді електричного диполя, то у навколишній зоні переважає електричне поле, а якщо уявити у вигляді рамки зі струмом, то переважає магнітне поле. У першому випадку можна говорити про електростатичне поле, а у

другому – про магнітостатичне. Наприклад, високовольтні елементи та пристрої можуть бути подані електричним диполем, а котушки індуктивності, трансформатори, друковані провідники – рамкою зі струмом;

- вибираємо конструктивну форму екрана у вигляді паралелепіпеда, циліндра або сфери. Форма екрана впливає на ефективність екранування та на резонансні якості, а саме, на значення частоти, на якій відбувається різке зростання магнітного або електричного поля всередині екрана. Для порівняння екранів різних форм вводять загальний параметр – еквівалентний радіус R_e . Для екрана прямокутної форми

$$R_e = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} l_1 l_2 l_3}, \quad (7.13)$$

для циліндричного екрана

$$R_e = \sqrt[3]{\frac{3}{16} D^2 h}, \quad (7.14)$$

для сферичного екрана $R_e = r_e$.

Нижня резонансна частота екрана визначається за формулою

$$f_{рез} \cong \frac{138}{R_e} 10^6, \quad (7.15)$$

Значення резонансної частоти не повинно входити в спектр частот завади.

- вибираємо матеріал і конструкцію стінок екрана. Матеріал стінок екрана найбільше впливає на ефективність екранування. Великою, що характеризує екранувальну дію матеріалу, є глибина проникнення δ (на такій глибині напруженість електричного поля зменшується в n разів);

$$\delta = 0,52 (\pi f \mu_r \sigma), \quad (7.16)$$

де f - частота поля завади, МГц;

μ_r - відносна магнітна проникність;

σ - питома провідність матеріалу екрана, См/м.

Характеристики матеріалів екранів наведені в таблиці 7.4.

- розраховуємо ефективність екранування вибраного екрана та його необхідну товщину.

7.2.1 Розрахунок магнітостатичного екрана

Екранування магнітних полів виконується на основі шунтування магнітного поля феромагнітними матеріалами (магнітостатичне екранування) та на основі витіснення магнітного поля полем вихрових струмів в екрані.

При магнітостатичному екрануванні відбувається замикання магнітного поля, утвореного постійними магнітами або струмами, що

протікають по електричних колах апаратури, екраном внаслідок його підвищеної магнітної проникності.

Якщо екран виконати із феромагнітних матеріалів (пермалой, сталь) з великою магнітною проникністю, то магнітний потік замикається в

Таблиця 7.4 – Електричні параметри матеріалів, призначених для екранування

Матеріал	Питома провідність σ , См/м 10^{-7}	Відносна магнітна проникність μ_r	Матеріал	Питома провідність σ , См/м 10^{-7}	Відносна магнітна проникність μ_r
Алюміній	3,54	1	Залізо	1,0	1100 - 22000
Латунь	1,25	1	Нікель	1,38	12 - 80
Мідь	5,8	1	Сталь	0,66	150
Срібло	6,2	1	Пермалой	0,42	80 - 8000

основному на стінках екрана, який має менший магнітний опір у порівнянні з опором повітряного простору, зайнятого екраном. При цьому ефективність екранування буде тим вища, чим менше стиків, швів і розрізів, які ідуть поперек напрямку ліній магнітної індукції.

Ефективність екранування для циліндричного екрана визначається за формулою

$$E = 20 \lg [1 + 0,25(1 - r_1^2 / r_2^2)(\mu_r + 1 / \mu_r - 2)] \quad (7.17)$$

де r_1 - зовнішній радіус екрана;

r_2 - внутрішній радіус екрана.

Відповідно до заданих E , μ_r і r_2 визначаємо товщину екрана

$$d = r_2 \left[1 - \sqrt{1 - 4(10^{E/20} - 1) / (\mu_r + 1 / \mu_r - 2)} \right] \quad (7.18)$$

Для прямокутного екрана

$$E = 20 \lg [1 + (1 - a_1^2 / a_2^2)(\mu_r + 1 / \mu_r - 2)] \quad (7.19)$$

де a_1 , a_2 - внутрішній та зовнішній розмір екрана,

тоді

$$d = 0,5a_2 \left[1 - \sqrt{1 - (10^{E/20} - 1) / (\mu_r + 1 / \mu_r - 2)} \right]. \quad (7.20)$$

Для сферичного екрана

$$E = 20 \lg \left\{ 1 + 0,22 \left[1 - \frac{(r-d)^3}{r^3} \right] \left(\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2 \right) \right\}, \quad (7.21)$$

тоді

$$d = r \left[1 - \sqrt[3]{1 - 4,5(10^{E/20} - 1)/(\mu_r + 1/\mu_r + 2)} \right]. \quad (7.22)$$

При магнітостатичному екрануванні та проектуванні екранів необхідно виконати такі вимоги:

- магнітна проникність матеріалу екрана повинна бути якомога більшою;
- збільшення товщини стінок приводить до збільшення ефективності екранування, але необхідно враховувати можливі конструктивні обмеження за масою та габаритами;
- стики, розрізи та шви повинні розміщуватися паралельно лініям магнітної індукції;
- заземлення екрана не впливає на ефективність екранування.

Дія металевого екрана у змінному високочастотному магнітному полі ґрунтується на використанні явища електромагнітної індукції, що викликає вихрові струми в екрані, які утворюють вторинне магнітне поле, направлене зустрічно полю у зону, яку захищають.

В результаті при конструюванні високочастотних функціональних вузлів апаратури в якості матеріалів екранів найчастіше використовують немагнітні матеріали, які забезпечують достатню ефективність і вносять в екрановані вузли менше втрат у порівнянні з магнітними матеріалами. Еквівалентна глибина проникнення для різних матеріалів в області високих частот достатньо мала, тому екран з будь-якого матеріалу порівняно невеликої товщини забезпечить ефективне екранування. При конструюванні таких екранів найчастіше постає питання забезпечення жорсткості, стійкості до механічних впливів, стійкості до корозії та технологічності конструкції.

Таким чином основні вимоги до конструювання екранів, що діють методом витіснення магнітного поля вихровими струмами, такі:

- товщину екрана необхідно вибирати більшою за еквівалентну глибину проникнення;
- ефективність екранування підвищується зниженням опору вихровим струмам, тому найчастіше виготовляють екрани з алюмінію, міді та латуні;
- стики, розрізи та шви повинні розміщуватись у напрямку вихрових струмів в екрані;
- заземлення екранів, що працюють за рахунок утворення вихрових струмів, не впливає на ефективність екранування.

7.2.2 Розрахунок електростатичного екрана

Принцип електростатичного екранування полягає у замиканні силових ліній завадонесучого електричного поля на металевий екран, який з'єднаний з корпусом апаратури або землею.

Ефективність екранування плоского листового електростатичного екрана визначається за формулою

$$E = 20 \lg [5r^3 / (a^2 a_1 - a a_1^2)], \quad (7.23)$$

де r – радіус еквівалентного плоского екрана; $r = \sqrt{S_e / \pi}$;

S_e – площа поверхні екрана;

a – відстань між джерелом і приймачем завади;

a_1 – відстань від екрана до приймача завади.

Для електростатичного екрана замкнутої форми ефективність екранування становитиме

$$E = 20 \lg (60 \pi d \sigma). \quad (7.24)$$

При екрануванні електричного поля слід дотримуватись таких норм:

- конструкція екрана повинна бути такою, щоб силові лінії електричного поля в основному замикались на стінки екрана, не виходячи за його межі;

- в області низьких частот ефективність екранування мало залежить від матеріалу та товщини екрана, а залежить тільки від якості заземлення екрана на корпус (в залежності від співвідношення еквівалентної глибини проникнення δ і товщини стінки екрана d , частоти, при яких $d < \delta$, можуть бути умовно названими низькими, а частоти, при яких $d > \delta$, - високими);

- в області високих частот ефективність екранування залежить від якості заземлення, від товщини, провідності і магнітної проникності екрана.

7.2.3 Розрахунок електромагнітних екранів у дальній зоні випромінювання

Електромагнітний режим екранування охоплює частотний діапазон $10^3 - 10^9$ Гц при умові, що відстань від екрана до джерела завад більша $5 - 6\lambda$, а поперечні розміри екрана менші довжини хвилі завади.

Ефективність екранування суцільного електромагнітного екрана в дальній зоні випромінювання визначається за формулою

$$E = 20 \lg [ch(kd)] + 20 \lg [1 + 0,5(Z_B / Z_E + Z_E / Z_B)th(kd)], \quad (7.25)$$

де d – товщина екрана;

Z_B – характеристика опору навколишнього простору, для плоскої хвилі $Z_B = 120\pi$ Ом;

Z_E – характеристика опору металу екрана;

$$z_e = \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_r \cdot \mu_0 / \sigma} e^{j\pi/4}, \mu = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}, \quad (7.26)$$

k – коефіцієнт вихрових струмів

$$k = \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \sigma} \cdot e^{j\pi/4} \quad (7.27)$$

7.2.4 Розрахунок електромагнітних екранів у ближній зоні випромінювання

Ефективність екранування циліндричного електромагнітного екрана у ближній зоні випромінювання розраховується за формулою 7.25, враховуючи, що величина Z_B для екранування електричної складової поля становитиме

$$(Z_B)_E = -j(2\pi f \epsilon_r \epsilon_0 r_e)^{-1}, \quad (7.28)$$

а для екранування магнітної складової

$$(Z_B)_M = -j2\pi f \epsilon_r \epsilon_0 r_e.$$

Для сферичного екрана

$$(Z_B)_E = -j18 \cdot 10^9 / (fr \sqrt{2}); (Z_B)_M = j158 \cdot 10^{-7} fr / \sqrt{2}. \quad (7.29)$$

Для прямокутного екрана

$$(Z_B)_E = -j136 \cdot 10^9 / fr; \delta = 0,52(\pi f \mu_r \sigma)^{-0,5}, \quad (7.30)$$

де r – половина відстані між стінками екрана, повернутими до джерела поля завади.

В діапазоні низьких частот (до 10^4 Гц) для випадку екранування електричного поля в ближній зоні

$$E_E = 20 \lg [1 + 0,5(Z_B)_E d \sigma], \quad (7.31)$$

При екрануванні магнітного поля в ближній зоні в низькочастотному діапазоні екран із магнітного матеріалу і сплаву має ефективність екранування

$$E_M = 20 \lg [1 + \mu_r d / 2r], \quad (7.32)$$

а із немагнітних матеріалів

$$E_M = 20 \lg [1 + \kappa^2 r d / 2]. \quad (7.33)$$

7.2.5 Розрахунок перфорованих екранів і сіткових екранів

Для перфорованих екранів ефективність екранування

$$E = 20 \lg \left[\sqrt{\sigma \delta Z_B} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{r}} \left(\frac{a-D}{a} \right)^2 \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda} \right)^6 e^{\frac{2\pi d}{m}} \right], \quad (7.34)$$

де a - відстані між центрами отворів;

D - діаметр отворів;

m - найбільший розмір отворів в екрані. Ця формула придатна для діапазону довжин хвиль $\lambda > \pi m$. При $\lambda \cong \pi m$ ефективність екранування буде незначною.

Для екранів, виготовлених із сіткових матеріалів, за товщину екрана приймають еквівалентну товщину сітки $d = \pi r^2/S$.

Формула для розрахунку ефективності таких екранів прийме вигляд

$$E = 20 \lg \left[\sqrt{\sigma d Z_B} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{r}} e^{\frac{2\pi}{S-2r}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda} \right)^6 e \right] \quad (7.35)$$

При проектуванні перфорованих екранів пропонується:

- розміщувати отвори у зоні зі слабкими електромагнітними полями;
- при заданій площі перфорації, виходячи з конструкторських міркувань, необхідно зменшувати діаметри отворів, збільшуючи їх кількість;
- виконувати отвори у вигляді щілин, розміщуючи їх довгі сторони вздовж лінії вихрових струмів, наведених у стінках екрана;
- у діапазоні НВЧ виконувати отвори у вигляді хвилеводів.

7.2.6 Багатошарові екрани

У випадку одношарового магнітного екрана при великій напруженості матеріал екрана входить у режим насичення і ефективність екранування різко зменшується. Щоб усунути насичення, застосовують двошарові екрани, один із шарів якого, що направлений до джерела магнітного поля, виконується із магнітного матеріалу з низькою магнітною проникністю, яка має високий рівень насичення, або з немагнітного матеріалу, а другий шар з матеріалу з високою магнітною проникністю. При цьому перший шар екрана зменшує напруженість магнітного поля до значення, яке не викликає насичення другого шару, який і забезпечує екранування.

Внутрішні шари багатошарового екрана для забезпечення найбільшої екранувальної дії і досягнення найменших втрат, слід виконувати із немагнітних металів. Найкращі результати дає екран з поєднанням шарів з немагнітних і магнітних металів (наприклад, мідь - сталь, мідь - сталь - мідь). Це пов'язано з тим, що найбільший ефект екранування забезпечується за рахунок високої якості відбиття міді та поглинання сталі.

Застосування діелектричних прокладок (пластмаса, картон, папір), повітряних зазорів між металевими шарами екрана може привести до підвищення екранування у випадку, якщо їх товщина значно перевищує товщину металевих шарів. Тому такі екрани можуть використовуватись, коли в умовах на конструювання допускається збільшення розмірів та маси екранів.

Вибір оптимального співвідношення товщини шарів в екрані мідь – сталь при екрануванні магнітних полів слід виконувати з урахуванням таких характерних частотних особливостей:

- на частотах від 0 до 0,5 кГц найбільша ефективність забезпечується однорідним сталевим екраном. Це пов'язано з тим, що у даному діапазоні електромагнітне екранування практично відсутнє, тому екранувальна дія міді дуже мала і сталевий шар працює у магнітостатичному режимі;

- на частотах від 0,5 кГц до 10 кГц найбільша ефективність досягається при рівній товщині міді та сталі. Це пояснюється тим, що мідний шар переходить в електромагнітний режим роботи, в той час як сталевий екран продовжує працювати в електростатичному режимі;

- на частотах від 10 кГц до 1000 кГц мідний і сталевий шар працюють в електромагнітному режимі, зі зростанням частоти оптимальна частота міді зменшується, а сталі збільшується за рахунок великого впливу поглинання;

- на частотах, більших 1000 кГц, застосування складних екранів недоцільне, оскільки велика ефективність екранування забезпечується однорідним сталевим екраном.

Контрольні питання:

1. Які паразитні зв'язки виникають при конструюванні та роботі радіоелектронної апаратури?
2. Як визначити допустиму довжину провідників цифрових схем з умови електромагнітної сумісності?
3. Як визначити допустиму довжину провідників аналогових схем з умови електромагнітної сумісності?
4. Чим забезпечується електромагнітне екранування?
5. Як визначити ефективність екранування?
6. Наведіть послідовність розрахунку екранів.
7. Які конструктивні види екранів використовуються для захисту апаратури?
8. Як конструюють багатошарові екрани?
9. Які матеріали використовують при проектуванні екранів?
10. З допомогою яких конструктивних параметрів провідників можна зменшити паразитну ємність?

8 ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ КОНСТРУКЦІЙ РЕА

8.1 Загальні положення охолодження радіоелектронної апаратури

Більшість пристроїв радіоелектроніки використовують лише невелику кількість споживаної від джерел живлення енергії у вигляді корисної енергії сигналів, решта перетворюється у теплову і віддається у навколишнє середовище. Загальний тепловий фон буде визначатися питомою потужністю і щільністю теплового потоку, що проходить крізь кожух пристрою.

Тепловий режим - це просторово-часове розподілення температури в РЕА. Під заданим температурним режимом розуміють такий режим, при якому температура кожного із елементів блока дорівнює заданій або не виходить за межі допустимої.

За характером руху теплоносія системи охолодження діляться на системи примусового і природного охолодження пристроїв. Основна частка перенесення теплової енергії в цих системах відбувається за рахунок конвекції, а також за рахунок випромінення і теплопровідності.

В нормальних кліматичних умовах і природному охолодженні біля 70% відводиться за рахунок конвекції, приблизно 20% - за рахунок випромінення і 10 % за рахунок теплопровідності.

Покращити передачу тепла від теплонавантажених елементів до більш холодних деталей конструкції можливо за рахунок зниження теплових опорів. Малі теплові опори внутрішніх ділянок блока від корпусу до всіх елементів конструкції сприяють вирівнюванню температури всередині блока, що приводить до підвищення надійності (таблиця 8.1).

Таблиця 8.1 – Контактні теплові опори пар металів

Матеріали конструкцій	Тепловий опір, $\text{см}^2 \cdot \text{K/Вт}$
Мідь - алюміній	0,08
Мідь - мідь	0,1
Мідь - латунь	0,18
Мідь сплав Д16Т	0,2
Сплав Д16Т - сплав Д16Т	0,25
Сталь - мідь	0,8
Сталь - сплав Д16Т	1,2
Сталь - сталь	2,5
Метал – фарба - метал	20

Контактні теплові опори можуть бути зменшені за рахунок: застосування матеріалів з більшою теплопровідністю, вибору більш

пластичних матеріалів, зменшення шорсткості з'єднувальних поверхонь, застосування пластичних прокладок з великою теплопровідністю.

Для зниження теплового фону в конструкції при природному охолодженні необхідно виконати такі заходи:

- забезпечити обтікання холодним повітрям всіх елементів конструкції, особливо теплонавантажених;
- теплонавантажені елементи повинні розміщуватись ближче до стінок блока;
- теплочутливі елементи повинні захищатись від нагрітого повітря;
- всі теплонавантажені елементи повинні мати щільні контакти з несучими вузлами;
- тепловидільні блоки повинні розміщуватись у верхній частині конструкції пристрою.

8.2 Попереднє оцінювання теплового навантаження РЕА

Якщо потужність, що розсіюється блоком, приблизно однакова (розбіжність становить не більше 15%), то питома потужність становить:

$$P_{\text{ном}} = \frac{\sum P_i}{2(L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_1 L_3)} \quad (8.1)$$

де $\sum P_i$ – сумарна потужність джерела тепла, Вт;

$L_1 L_2 L_3$ – геометричні розміри блока, м

Якщо потужність розподілена між блоками нерівномірно, то питома потужність становить:

$$P_{\text{ном}} = \frac{P_{i \max}}{2H_i(L_1 + L_2)} \quad (8.2)$$

де $P_{i \max}$ - теплова потужність найбільш навантаженого блока, Вт;

H_i – висота блока, м

Попереднє оцінювання здійснюється за діаграмою (рисунок 8.1). По осі абсцис відкладена питома потужність, а по осі ординат – допустимий перегрів всередині блока

$$\theta_{\text{доп}} = t_{\text{доп}} - t_c \quad (8.3)$$

де $\theta_{\text{доп}}$ – допустимий перегрів, °С;

$t_{\text{доп}}$ - допустима температура нагрітих зон всередині блока, °С;

t_c - температура навколишнього середовища, °С.

Для заданих значень питомої потужності і перегріву на діаграмі (рисунок 8.1) знаходять відповідну точку. При цьому може бути три випадки:

- знайдена точка лежить вище лінії 1 (вертикальне шасі) або 1' (горизонтальне шасі). В цьому випадку можлива пилотажна або герметична конструкція;

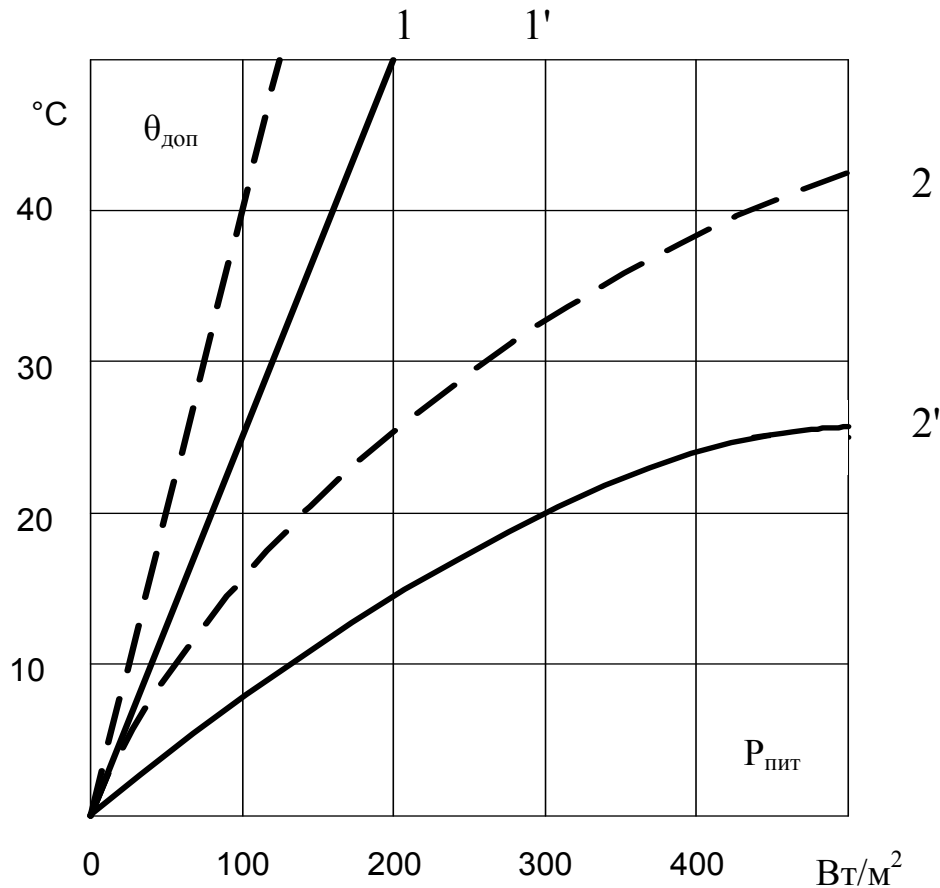


Рисунок 8.1 – Діаграма для наближеного оцінювання теплового режиму

- точка на діаграмі попадає в зону між кривими 1 і 2 (горизонтальне шасі) і між кривими 1' і 2' (вертикальне шасі). В цьому випадку можливе використання перфорованих кожухів.

- точка нижче лінії 2 або 2' і це означає, що потрібне примусове охолодження.

8.3 Розрахунок охолодження при природній конвекції з герметичним кожухом

Розрахунок охолодження при природній конвекції зводиться до визначення теплової характеристики кожуха в нагрітій зоні РЕА. Тепловою характеристикою зони називається функціональна залежність

перегріву від потужності тепловиділення. Зв'язок між потужністю P і середнім перегрівом поверхні Δt виражається залежністю

$$P = \Delta t \sigma_K \quad (8.4)$$

де $\Delta t = t_K - t_c$;

t_K - температура кожуха, °C;

t_c - температура навколишнього середовища, °C;

σ_K - теплова провідність матеріалу кожуха.

Теплова провідність кожуха визначається як сума теплової провідності верхньої і нижньої поверхонь і бокових стінок:

$$\sigma_K = \sigma_{K.B} + \sigma_{K.H} + \sigma_{K.6}$$

або

$$\sigma_K = \alpha_B S_B + \alpha_H S_H + \alpha_6 S_6 \quad (8.5)$$

де α_B , α_H , α_6 - повні коефіцієнти тепловіддачі верхньої, нижньої і бокової поверхні, Вт / (м² · К);

S_H , S_B , S_6 - площа нижньої, верхньої і бокової поверхні, м²

Повний коефіцієнт тепловіддачі поверхні дорівнює сумі конвективного коефіцієнта та коефіцієнта випромінення:

$$\alpha_i = \alpha_{ki} + \alpha_{pi} \quad (8.6)$$

де α_i - коефіцієнт теплопередачі;

α_{ki} - коефіцієнт конвективної передачі тепла;

α_{pi} - коефіцієнт випромінення.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією визначається за законом степені ¹/₄:

$$\alpha_K = 0,54 \cdot (\beta \cdot g \cdot P \cdot r)_m^{1/4} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/2}} \left(\frac{t_1 - t_c}{L} \right)^{1/4} N \quad (8.7)$$

де β - коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹;

g - прискорення сили тяжіння, м/с²;

P - потужність теплових втрат, Вт;

r - тепловий опір, Вт/(м² · К);

λ - теплопровідність, Вт/(м · К);

ν - кінематична в'язкість, м²/с;

t_1 - задана температура кожуха, °C, дана температура задається таким чином, щоб перегрів кожуха становив 5 – 10 °C;

t_c - температура навколишнього середовища, °C;

L - геометричні розміри пристрою, м.

N – коефіцієнт, що враховує орієнтацію нагрітої зони відносно горизонталі.

Коефіцієнт випромінювання визначається як:

$$\alpha_{pi} = \varepsilon_i \cdot \varphi_{ij} \cdot f(t_i, t_j) \quad (8.9)$$

де ε_i – приведена ступінь чорноти зовнішньої поверхні кожуха;

φ_{ij} – коефіцієнт взаємного випромінювання, якщо навколо немає ніяких тіл, то коефіцієнт дорівнює 1;

$f(t_i, t_j)$ – функція температури для одиничного блока.

$$f(t_k, t_c) = 5,67 \frac{\left(\frac{t_k + t_c}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_c + 273}{100}\right)^4}{t_k + t_c} \quad (8.10)$$

де t_k – температура кожуха, °C;

t_c – температура навколишнього середовища, °C.

Потужність, що розсіюється блоком, визначається за формулою 8.4.

Температура нагрітої зони в першому наближенні визначається як:

$$t_3^I = t_c + (t_k - t_c) (1 + \sigma_k / \sigma_3) \quad (8.11)$$

Теплова провідність нагрітої зони визначається за формулою:

$$\sigma_3 = \sum_{i=1}^3 (\kappa_i + \alpha_{li}) S_i \quad (8.12)$$

де κ – коефіцієнт теплопередачі;

S_i – площа теплопередачі, м².

Задача зводиться до знаходження коефіцієнтів випромінювання і конвекції у замкнутому просторі. Коефіцієнт випромінювання знаходиться за формулою 8.9, в якій коефіцієнт взаємного випромінювання φ_{ij} прирівнюється до одиниці, оскільки поверхня кожуха повністю охоплює умовну нагріту зону, тому :

$$\alpha_{pi} = \varepsilon_i \cdot f(t_3, t_k) \quad (8.13)$$

де ε_i – приведена ступінь чорноти поверхні нагрітої зони і кожуха;

t_3 – температура нагрітої зони в першому наближенні, °C;

t_k – температура кожуха, °C.

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{3i}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{ki}} - 1 \right) \frac{S_{3i}}{S_{ki}}}, \quad i = 1, 2; \quad (8.14)$$

де ε_{3i} і ε_{ki} – ступінь чорноти реальної нагрітої зони і внутрішньої поверхні кожуха;

S_{3i} – площа нагрітої зони, $S_{3i} = l_1 \cdot l_2$;

S_{ki} – площа внутрішньої поверхні кожуха,

$S_{ki} = 2h_i (L_1 + L_2 - 4L_4) + (L_1 - 2L_4) (L_2 - 2L_4)$;

h_i – відстань до нагрітої зони, м;

L_1, L_2 – довжина і ширина блока, м;

L_4 – товщина стінки кожуха, м;

l_1, l_2 – внутрішні розміри блока, м.

Бокова поверхня умовно нагрітої зони може значно відрізнятися від реальної, тому приведену ступінь чорноти бокової поверхні визначають як

$$\varepsilon_{п б} = \varepsilon_{з б} \varepsilon_{к б} \quad (8.15)$$

де $\varepsilon_{з б}$ – ступінь чорноти бокової поверхні реально нагрітої зони;

$\varepsilon_{к б}$ – ступінь чорноти внутрішньої бокової поверхні кожуха в нагрітій зоні.

Коефіцієнт теплопередачі розраховується за формулою

$$\kappa_t = N \left[6,25 - 5,25 \left(1 + \frac{h_i}{l} \right)^{-1,67} \right] \times 0,24 \lambda_B \frac{(\beta g \text{Pr})^{1/4}}{\nu^{1/2}} \sqrt[4]{\frac{t_3 - t_k}{h_i}} \quad (8.16)$$

де $N = 1,3$ і $N = 1$ для горизонтального і вертикального шасі, відповідно;

$$l = \sqrt{l_1 l_2}.$$

Температура нагрітої зони у другому наближенні становитиме

$$t_3^{\text{II}} = t_c + P^{\text{I}} (1/\sigma_k + 1/\sigma_3) \quad (8.17)$$

Якщо значення температур у першому і другому наближеннях відрізняється одне від одного більше ніж на 10%, то проводять розрахунок у третьому наближенні, при цьому температура нагрітої зони визначається за формулою

$$t_3^{\text{III}} = 0,5 (t_3^{\text{I}} + t_3^{\text{II}}) \quad (8.18)$$

Для побудови теплової характеристики можна знайти інші точки аналогічним методом.

8.4 Розрахунок природного охолодження з перфорованим кожухом

Герметичний корпус не завжди забезпечує нормальний тепловий процес, тому при конструюванні використовують додаткові методи, зокрема вентиляційні отвори (жалюзі).

Задача розрахунку полягає у встановленні залежності між потужністю, що розсіюється блоком, температурою окремих частин конструкції, геометричними і фізичними параметрами та умовами експлуатації. Для цього необхідно зробити деякі припущення:

- нижня поверхня шасі поділяє внутрішній об'єм на дві рівні частини з температурами t_1 і t_2 , тобто температура всередині даної ділянки не змінюється і дорівнює середньоарифметичному значенню температур вхідного і вихідного повітря (рисунок 8.2)

$$\begin{aligned} t_1 &= 0,5 (t_c + t_{н.ш}); \\ t_2 &= 0,5 (t_{н.ш} + t_{вих}) \end{aligned} \quad (8.19)$$

де t_1 – середня температура повітря в нижній частині блока, °С;
 t_2 – середня температура повітря в верхній частині блока, °С;
 t_c – температура навколишнього середовища, °С;
 $t_{н.ш}$ – температура повітря біля нижньої поверхні шасі, °С;
 $t_{вих}$ – температура повітря, що виходить із блока, °С.

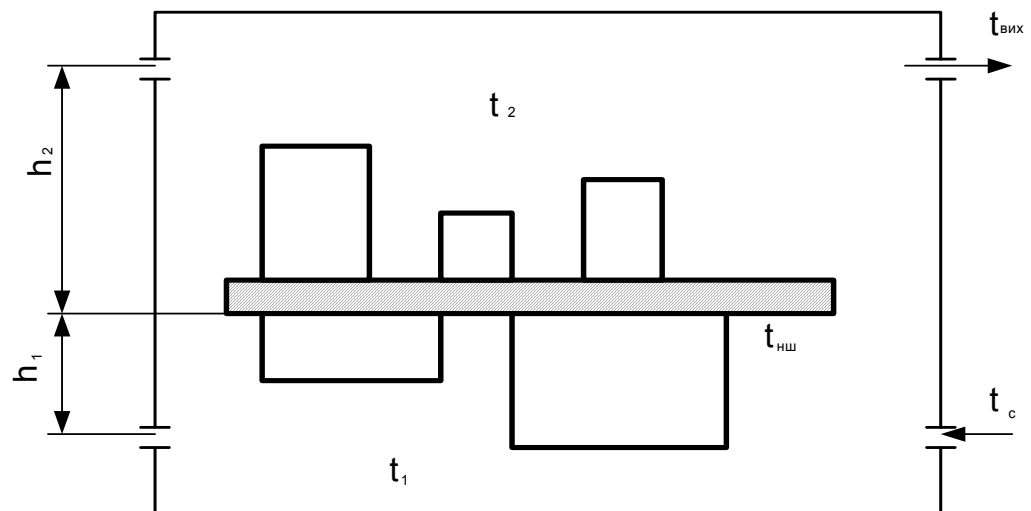


Рисунок 8.2 –Схема блока з перфорованим кожухом

- нагрівання повітря проходить тільки за рахунок конвекції;
- коефіцієнт тепловіддачі для всіх поверхонь буде однаковим;
- кожух і нагріту зону будемо вважати ізотермічними поверхнями.

Перегрів кожуха із заданою температурою нагрітої зони становитиме

$$(t_k - t_c) = 0,75 (t_k - t_c)_Г, \quad (8.20)$$

де $(t_k - t_c)_Г$ – перегрів герметичного кожуха, що відповідає середньоповверхневій температурі нагрітої зони t_3 .

Потужність, що розсіюється випроміненням з поверхні нагрітої зони визначається як

$$P_{3,Л} (t_3, t_k) = \varepsilon_{\Pi} f (t_3, t_k) (t_3 - t_k) \varphi_{3,К} S_{3,Л}, \quad (8.21)$$

де ε_{Π} – приведена ступінь чорноти нагрітої зони і внутрішньої поверхні кожуха (формула 8.14);

$S_{3,Л}$ – площа поверхні нагрітої зони, m^2 ;

$\varphi_{3,К}$ – коефіцієнт взаємного випромінення нагрітої зони і внутрішньої поверхні кожуха, якщо знехтувати отворами кожуха, то $\varphi_{3,К} = 1$;

$f (t_3, t_k)$ – температурна функція (формула 8.10).

Температуру першої і другої частини блока необхідно визначати за декілька етапів. Температура t_1 визначається за формулою:

$$at_1^2 - \delta t_1 + b = 0, \quad (8.22)$$

$$\text{де } a = 2(S_{31} + S_{\kappa 1}) - \frac{S_{\kappa 1}}{S_{\kappa 2}} (S_{32} + S_{\kappa 2} - S_{31} - S_{\kappa 1});$$

$$\delta = \left(2 + \frac{S_{\kappa 1}}{S_{\kappa 2}} \right) A_1 + A_2 - D(S_{32} + S_{\kappa 2} - S_{31} - S_{\kappa 1}) + \left(S_{31} - \frac{S_{\kappa 1}}{S_{\kappa 2}} S_{32} \right) t_c;$$

$$b = DA_1 + [A - (S_{32} + S_{\kappa 2})D] \cdot t_c;$$

$$A_1 = S_{31} t_3 + S_{\kappa 1} t_k; \quad A_2 = S_{32} t_3 + S_{\kappa 2} t_k; \quad A = A_1 + A_2;$$

$$D = \frac{S_{\kappa 1}}{S_{\kappa 2}} t_k - \frac{\Delta P}{\alpha S_{\kappa 2}}; \quad \Delta P = P_{3,Л} - P_{\kappa};$$

$S_{\kappa 1}, S_{\kappa 2}$ – площа поверхні кожуха без перфорації першої і другої зони, m^2 ;

S_{31}, S_{32} – площа нагрітої зони вище і нижче відносно шасі, m^2 ;

t_k – температура корпуса, $^{\circ}C$;

Температура у верхній зоні блока визначається як

$$t_2 = D - \frac{S_{\kappa 1}}{S_{\kappa 2}} t_1 \quad (8.23)$$

При конструюванні блоків із перфорацією необхідно знати витрату повітря G (кг/с), що проходить крізь отвори

$$G = S_1 \mu_1 T_c \rho_c \sqrt{2g} \sqrt{\frac{\frac{h_1 + h_2}{T_c} - \frac{h_1}{T_1} - \frac{h_2}{T_2}}{T_c + \left(\frac{S_1 \mu_1}{S_2 \mu_2}\right)^2 T_2 + \left(\frac{S_1 \mu_1}{S_{ш} \mu_{ш}}\right)^2 T_1}} \quad (8.24)$$

де $S_1, S_2, S_{ш}$ – площа отворів кожуха розміщених нижче, вище шасі та на самому шасі, m^2 ;

$\mu_1, \mu_2, \mu_{ш}$ – коефіцієнт розходу через нижні, верхні отвори відносно шасі та на самому шасі;

T_c, T_1, T_2 – абсолютна температура навколишнього середовища, верхньої і нижньої зони шасі, К;

ρ_c – щільність повітря навколишнього середовища, kg/m^3 ;

g – прискорення сили тяжіння;

h_1, h_2 – висота відповідно до рисунка 8.2, м.

Температура корпусу визначається за формулою:

$$t_{\kappa} = \frac{1}{S_{\kappa 1}} \left[\frac{2c_p G}{\alpha} (t_1 - t_c) + (S_{a1} + S_{\kappa 1}) \cdot t_1 - S_{\kappa 1} t_2 \right] \quad (8.25)$$

c_p – питома теплоємність, Дж/(кг·К)

α – коефіцієнт теплопередачі.

Повна потужність джерел енергії, розміщених в нагрітій зоні, розсіюється зовнішньою поверхнею кожуха, а частина – повітрям, що проходить через блок, тому

$$P = P_{\kappa} + 2Gc_p(t_2 - t_1) \quad (8.26)$$

Після проведених розрахунків уточнюють коефіцієнт α і повторюють розрахунок у другому наближенні. Якщо у другому наближенні між заданою температурою корпусу і температурою корпусу, розрахованою за формулою 8.25, отримаємо розходження більше 5%, то необхідно зробити розрахунок у третьому наближенні, при цьому вибирають

$$t_{\kappa}^{III} = t_{\kappa}^{II} - 0,1(t_{\kappa 1}^{II} - t_{\kappa}^{II}) \quad (8.27)$$

Кінцеві значення t_k і P визначаються рівняннями

$$\frac{t_k - t_k^{III}}{t_k - t_{k1}^{III}} = \frac{t_k^{II} - t_k^{III}}{t_{k1}^{II} - t_{k1}^{III}}; \quad (8.28)$$

$$P = P^{III} + \frac{t_k - t_k^{III}}{t_k^{II} - t_k^{III}} (P^{II} - P^{III})$$

В результаті ще на стадії конструкторської розробки можна визначити температуру всередині блока.

Контрольні питання:

1. Як теплові процеси впливають на роботу схеми?
2. Що таке тепловий режим блоків?
3. Як поділяються системи охолодження за характером руху теплоносія?
4. Які матеріали слід використовувати при конструюванні з точки зору теплових процесів?
5. За рахунок чого може бути зменшений тепловий контактний опір?
6. З яких основних етапів складається розрахунок герметичних блоків при природній конвекції?
7. З яких основних етапів складається розрахунок блоків з перфорованими отворами?
8. Який метод розрахунку покладений для підвищення точності розрахунку теплових процесів?

Додаток А

Позиційне позначення		Найменування			Кількість	Примітка				
		Конденсатори								
		<u>K10-17.ОЖО.460.174 ТУ</u>								
		<u>K50-35 ОЖО.464.214 ТУ</u>								
C1		K10-17-H90-0,1мкФ			1					
C2		K50-35 - 16В -22 мкФ			1					
C3		K50-35-16В-10мкФ			1					
C4		K10-17-H90-0ДмкФ			1					
DD1		Мікросхема КР1008ВЖ18			1					
K1		Реле РЕС 79			1					
		<u>Резистори</u>								
		<u>C2-23 ОЖ0.467.072ТУ</u>								
R1,R2		C2-23-0,25В - 100 кОм ± 10%			2					
R3		C2-23-0,25В - 910 кОм ± 10%			1					
R4		C2-23-0,25В - 3,9 кОм ± 10%			1					
R5		C2-23-0,25В - 12 Ом ± 10%			1					
R6		C2-23-0,25В - 51 Ом ± 10%			1					
R7		C2-23-0,25В - 24 кОм ± 10%			1					
					08-10 402.02.100ПЕЗ					
Змін	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	БЛОК АБОНЕНТА Перелік елементів		Літера	Лист	Листів	
Розроб.		Боярський							1	2
Перевір.		Лободзінська					TK-06			
Реценз										
Н.контр		Лободзінська								
Затв.		Філінюк								

[illegible]

Додаток Б

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка.
				<u>Документація</u>		
A1			08-10 402.02.100 СБ	Складальне креслення		
A1			08-10 402.02.100 ЭЗ	Схема електрична		
				принципова		
A4			08-10 402.02.100 ПЭЗ	Перелік елементів		
				<u>Деталі</u>		
		1	08-10 402.02.101	Плата	1	
		2	08-10 402.02.102	Виводи	17	
		3	08-10 402.02.103	Планка	1	
				<u>Інші вироби</u>		
		5		Діоди КД 522 В	3	VD1-VD3
				6P3.362.029ТУ		
		6		Конденсатори		
				K10-17-H90-0,1мкф		
				ОЖ0.461.214ТУ	2	C1,C4
				Конденсатори		
				ОЖО.464.214 ТУ		
		7		K50-35-16В-10мкф	1	C3
		8		K50-35-16В-22мкф	1	C2
Зм.	Лис	№докум	Підпис	Дата	08-10ДП.402.02.100	
Розроб.	Боярський				БЛОК АБОНЕНТА	Літера
Перевір	Лободзінська					Лист
Реценз.						Листів
Н.контр	Лободзінська					1
Затв.	Філінюк					2
					РТ-06	

[illegible]

Література

1. Базовий принцип конструювання РЭА/ Под ред. Е.М. Парфенова –М.: Радио и связь, 1981. – 120 с.
3. Гель П.П, Иванов-Есипович Н.К. Конструирование электронной аппаратуры. – Л.: Энергия, 1972. – 176 с.
4. Горобец А.И. Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры (печатные узлы). – К.: Техника, 1985. - 312 с.
5. Горохов В.А. Комплексная микроминиатюризация в электросвязи. – М.: Радио и связь, 1987. - 280 с.
6. ГОСТ 2.721-74. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах.
7. ГОСТ 2.702-75. ЕСКД. Правила выполнения электрических схем.
8. ГОСТ 23751-86. Платы печатные, основные размеры конструкции.
9. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Основи конструювання радіоелектронних засобів телекомунікаційних систем” для студентів бакалаврського напрямку 6.0910 – “Електронні апарати ” / укладач Р.Ф. Лободзінська, О.А. Герцій, – Вінниця: ВДТУ, 2002.
10. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств.– М.: Высшая школа, 1990. – 462 с.
11. Общетеchnический справочник /Под ред. Е. А. Скороходова - 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1982. - 416 с.
12. Ольхов Б.О. Основы проектирования сборочных единиц ЭВМ. Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 1980. - 255 с.
13. ОСТ 4.010.030-81. Установка навесных элементов на печатные платы. Конструирование.
16. Парфенов Е.М., Камышная Е.Н., Усачев В.П. Проектирование конструкций РЭА – М.: Радио и связь, 1989. - 272 с.
17. Разработка и оформление РЭА /Под ред. Э.Т.Романьчевой. – М.: Радио и связь, 1989. - 448 с.
18. Роцин Г.И. Несущие конструкции и механизмы РЭА. – М.: 1981. - 375с.
19. Сборник задач и упражнений по технологии РЭА. Учебное пособие под ред. Е.М.Парфенова.– М.: Высшая школа, 1982. -255 с.
20. Справочник конструктора РЕА. Общие принципы конструирования. /Под ред. Р.Г. Варламова.– М.: Советское радио, 1980. - 400 с.
21. Барась С.Т., Лободзінська Р.Ф., Лазарев О.О. Конструювання радіоелектронних засобів телекомунікаційних систем. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2004. – 82 с.

Навчальне видання

Раїса Фадеївна Лободзінська
Олександр Андрійович Костюк
Олександр Іванович Нікольський
Олександр Петрович Шеремета

КОНСТРУЮВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Навчальний посібник

Оригінал – макет підготовлено Лободзінською Р.Ф.

Редактор В.О. Дружиніна
Коректор З. В. Поліщук

Науково-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7х42 $\frac{1}{4}$
Друк різнографічний
Тираж прим
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Папір овсетний
Ум. друк. арк.. 4.44

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницький національний технічний університет
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ