

Тема 1. ВВЕДЕНИЕ.....	4
Цель, структура и задачи курса, его связь с другими дисциплинами.....	4
Общие вопросы конструирования. Основные понятия и определения.....	4
Тема 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭС И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ	7
Цель конструирования РЭС. Классификация и требования, предъявляемые к конструкциям РЭС.....	7
Схема классификации по классам и группам:	7
Дестабилизирующие факторы эксплуатации РЭС.....	9
Виды климатического исполнения РЭС.....	10
Категории размещения РЭС на объектах.....	11
Требования к РЭА:.....	11
Параметры конструкции РЭС.....	12
Взаимосвязь функциональных и материальных параметров.....	15
Связь между функциональными и материальными параметрами.....	15
Определение коэффициентов связи функциональных и материальных показателей.	16
Методы комплексной оценки качества РЭС.....	16
Стадии разработки РЭС. Разработка технологических документов.....	20
ТЗ содержит следующие разделы:.....	22
Техническое предложение (ТП).....	22
Эскизное проектирование.....	22
Техническое проектирование (ПТ).....	22
Рабочее проектирование.....	23
Многоуровневый принцип построения РЭС. Элементная база РЭС. Этапы развития элементной базы и конструкций РЭС. Интегральная схема (ИС), микросборка (МСБ), функциональный узел, блок, устройство, комплекс, система.....	25
Многоуровневый принцип построения РЭС.....	25
Принципы разукрупнения:	27
Методы конструирования РЭС.....	27
Роль стандартизации при конструировании РЭС.....	28
Базовый метод конструирования.....	29
Организационная структура проектирования и изготовления РЭС.....	30
Структура и виды технологических процессов.....	30
Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП).....	31
Структура и состав ЕСТПП.....	31
Стадии проектирования технологических процессов (ТП).....	31
Тема3. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСБОРОК.....	33
Классификация ИС и МСБ по функциональному назначению и конструктивно- технологическим признакам.....	33
Технологические методы изготовления МСБ.....	33
Технологические основы получения толстых и тонких пленок. Методы формирования конфигурации тонкопленочных элементов МСБ и их сравнительная характеристика...	33
Основа толстопленочной технологии	33
Коммутационные платы микросборок.....	35
Основа конструирования гибридных тонкопленочных микросборок: анализ ТЗ, разделение на элементы и компоненты схемы, выбор пленочных материалов, расчет конструкции тонкопленочных резисторов, конденсаторов, индуктивностей, проводников и контактных площадок.....	38
Стабилизация и подгонка параметров элементов гибридных МСБ.....	38
Принципы разработки топологии и защиты от внешних воздействий гибридных МСБ..	38
Герметизация микросхем и микросборок.....	38

Тема 4. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК И БЛОКОВ РЭС.....	44
Общая методология конструирования РЭС. Факторы, учитываемые при разработке конструкции РЭС.	44
Размещение РЭС на летательных аппаратах. Компоновка и конструирование РЭС.	45
Цель компоновки. Методы выполнения компоновочных работ.	45
Виды печатных плат и методы их изготовления.	45
Структурные схемы ТП изготовления двухсторонних, многослойных печатных плат, многослойных керамических и полиимидных плат.	48
Технологические процессы изготовления печатных плат	48
Двухсторонние печатные платы (ДПП).	49
Многослойные печатные платы (МПП).	51
Компоновочные схемы функциональных ячеек (ФЯ) цифровых РЭС на корпусированных ИС и МСБ и бескорпусных МСБ. Выбор типоразмера печатной платы.	53
Компоновочные схемы ФЯ аналоговых РЭС на корпусированных ИС и МСБ и бескорпусных МСБ.	56
Базовые несущие конструкции ФЯ.	59
Технология сборки и монтажа ФЯ.	62
Компоновочные схемы блоков цифровых и аналоговых РЭС на корпусированных и бескорпусных ИС и МСБ.	63
Основные компоновочные схемы блоков	63
Компоновочные схемы блоков РЭС	64
Базовые несущие конструкции блоков.	66
Элементы электрических соединений в ФЯ и блоках. Технология выполнения электрических соединений межъячеечного и межблочного монтажа РЭС.	75
Тема 5. ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ РЭС ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	78
Виды механических воздействий и характер влияния на конструкцию РЭС.	78
Вибро- и ударопрочность, виброустойчивость. Критерии вибропрочности конструкции.	81
Расчетные модели для оценки вибропрочности радиоэлементов и элементов конструкции РЭС. Основы расчета частот механического резонанса и вибропрочности конструкций РЭС.	82
Конструктивные способы защиты РЭС от механических воздействий.	85
Виброизоляция. Эффективность виброизоляции.	85
Тема 6. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РЭС	86
Тепловые режимы. Основные понятия и определения.	86
Проблемы обеспечения нормальных тепловых режимов РЭС.	86
Показатели тепловых режимов.	93
Теплофизическая структура конструкций РЭС.	93
Механизмы передачи тепла. Тепловые модели типовых конструкций РЭС с системами естественного воздушного охлаждения (критерии).	94
Критериальные уравнения	96
Определение λ_K при естественной конвекции в неограниченном пространстве.	96
Схема определения α_K	97
Электротепловая аналогия.	98
Примеры составления тепловых схем.	99
Методы теплового моделирования и расчета тепловых режимов конструкций РЭС. ..	101
Методы теплового моделирования	101
Расчёт теплового режима блоков разъёмной и книжной конструкций	103
Задачи расчета теплового режима. Оценочный расчет тепловых режимов конструкций РЭС с естественным воздушным охлаждением и с естественной воздушной вентиляцией.	109

Классификация и эффективность систем охлаждения РЭС. Кондуктивно-конвективные, жидкостно-испарительные системы охлаждения.	109
Тема 7. ПАРАЗИТНЫЕ СВЯЗИ И НАВОДКИ В РЭС	111
Общая характеристика паразитных связей в МСБ, ФЯ и блоках аналоговых и цифровых РЭС. Критерии помехоустойчивости цифровых и аналоговых РЭС.	111
Расчет параметров электрических соединений РЭС по критерию помехоустойчивости.	112
Электрические параметры и классификация линий связи	112
Расчёт уровней перекрёстных помех при соединении электрически короткими линиями связи.....	114
Конструктивные методы уменьшения паразитных связей. Электростатическое и электромагнитное экранирование, выбор материалов экранов и расчет эффективности экранирования. Схемотехнические и конструктивные методы подавления кондуктивных наводок в цепях РЭС.....	118
Классификация экранов.	118
Основы теории работы экрана.	118
Электростатический экран.	119
Электромагнитный экран.....	121
Тема 8. КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ РЭС	123
Понятие о контроле качества изделия. Виды технического контроля РЭС.	123
Классификация и назначение видов испытаний РЭС. Технологические, климатические, механические испытания, испытания на надежность. Понятие об автономных и комплексных испытаниях бортового радиооборудования.	126
Тема 9. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЭС	131
Основные характеристики и параметры надежности.	131
Восстанавливаемые и невосстанавливаемые РЭС.	132
Показатели надежности невосстанавливаемых РЭС и связь между ними.....	132
Структурные схемы надежности.	134
Цель расчета надежности.....	136
Методы расчета надежности по внезапным отказам на стадиях технического предложения, эскизного и технического проекта.....	136

Тема 1. ВВЕДЕНИЕ

(2 ч. ЛК, 1 ч. СРС)

Цель, структура и задачи курса, его связь с другими дисциплинами.

Предметом дисциплины являются конструкции и технология изготовления радиоэлектронных средств (РЭС) различных уровней сложности: тонкопленочные микросборки, функциональные ячейки, блоки, несущие конструкции, элементы коммутации.

Задачи курса – изучить:

- основы конструирования бортовых (самолетных, ракетных, космических) и наземных РЭС на современной элементной базе, включая вопросы применения прикладных программных комплексов для автоматизированного проектирования на ПК конструкций РЭС различных структурных уровней;
- методы расчета, обеспечения надежности и качества функционирования РЭС на разных стадиях проектирования;
- структуру процессов производства в обеспечении качества и эксплуатационной надежности РЭС;
- основы принципов разработки технологии производства конструктивов РЭС на основе использования типовых (базовых) технологических процессов.

Дисциплина основана на знаниях, полученных при изучении дисциплины всех четырех семестров: «Специальные главы математики», «Инженерная графика», «Алгоритмические языки и программирование», «Электронные приборы», «Элементная база и материалы РЭС», «Радиотехнические цепи и сигналы» и сведениях, получаемых из параллельно читаемых курсов.

Общие вопросы конструирования. Основные понятия и определения.

#Конструкция (лат. *construetio* – строение, устройство, построение, план, взаимное расположение частей), англ. – *construction*, нем. – *die Konstruktion*, фр. – *construction*.

#Технология (греч. *techne* – искусство, мастерство + *logos* – понятие, учение), англ. – *techno-logy*, нем. – *die technologie*, фр. – *technologie*.

#Под конструкцией ЭА понимается совокупность элементов и деталей с различными физическими свойствами и формами, находящихся в определенной пространственной, механической, тепловой, электромагнитной и энергетической взаимосвязи. Эта взаимосвязь определяется электрическими схемами и конструкторской документацией и обеспечивает выполнение электронной аппаратурой заданных функций с необходимой точностью и надежностью в условиях воздействия на нее различных факторов: эксплуатационных, производственных, человеческих.

#Радиоэлектронное средство (РЭС) – понимают изделие и его составные части в основу которого положены средства радиотехники и электроники.

#Техническое средство – это помещение, либо орудие, использование которого обеспечивает удовлетворение определенных материальных потребностей.

#Изделие – предмет, предназначенный для многократного изготовления.

#Конструкция РЭС – это организованная совокупность деталей с различными физическими свойствами и формами, находящихся в организованной взаимосвязи, выполняющая заданные функции с требуемой точностью и надежностью в заданных условиях эксплуатации и предусматривающих её повторение в условиях производства.

Главными признаками конструкции являются наличие деталей и связей.

#Детали – это радиоэлементы, установочные элементы, элементы несущих конструкций.

#Связи в конструкции РЭС подразделяются на внешние и внутренние. Эти связи могут быть устойчивыми и неустойчивыми.

Внешние связи характеризуют воздействия на конструкцию РЭС со стороны:

1. Окружающей среды (климата),
2. Объекта установки (электромагнитные, механические),
3. Со стороны оператора.

Внутренние связи характеризуют внутреннюю структуру конструкции РЭС. Внутренние связи разделяются на:

1. Физические (преобразование и передача энергии, сигналов):
 - электрические,
 - электромагнитные (паразитные),
 - тепловые,
 - оптические,
 - т.н. упругие (кварцевые фильтры, резонаторы);
2. Механические (механическая целостность и прочность конструкции):
 - кинематические,
 - устойчивые (параметры данных связей не изменяются во времени),
 - неустойчивые;
3. Геометрические (взаимное расположение отдельных деталей конструкции).

Конструкция представляет собой абстракцию, отраженную с помощью конструкторской документации. Таким образом, разработка конструкции сводится к разработке конструкторской документации.

Комбинация деталей и связей характеризует внутреннюю структуру конструкции. В свою очередь структура конструкции определяет её свойства. Количественной оценкой свойств служат параметры конструкции.

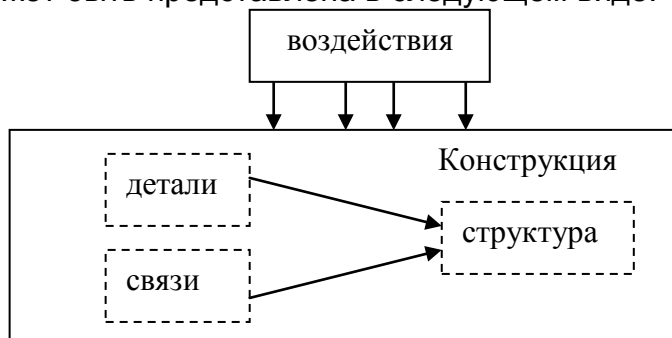
Комбинируя детали и связи, можно получать конструкции с различными свойствами.

Пример:

Деталь:	Электрическая связь:
транзистор	объемные проводники
транзистор	печатные проводники
ИМС	печатные проводники

Графическое и математическое представление конструкции.

Любая конструкция может быть представлена в следующем виде:



Математическое толкование конструкции:

1. Множество структур $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$.
2. Множество параметров $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$.
3. Множество воздействий $X = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$.

Между указанными множествами существует взаимосвязь:

$$\begin{aligned}S_i &= S_i(x_1, x_2, \dots, x_k), \\Y_i &= Y_i(x_1, x_2, \dots, x_k), \\S_i &= S_i(S_1, S_2, \dots, S_{n-1}, Y_1, Y_2, \dots, Y_m).\end{aligned}$$

Разработка конструкции производится на основании ТЗ, в котором оговариваются части множеств структур, параметров и воздействий. Задачей конструктора является по заданным частям этих множеств определить полное множество параметров, структур и воздействий.

#Конструирование РЭС – процесс выбора структуры пространственных электрических связей внутри и вне радиоэлектронного средства, приводящий к установлению норм и правил к его изготовлению и эксплуатации.

#Метод конструирования – способ исследования, выявления и отражения в КД множеств параметров, структур и воздействий по заданным частям этих множеств.

Существуют две точки зрения в определении проектирования и конструирования:

1. Весь процесс разработки – конструирование, проектирование – является частью этого процесса и включает решение задач системо- и схемотехники.
2. Весь процесс разработки – проектирование, конструирование – является частью этого процесса, где решаются задачи разработки КД. Эта точка зрения отражается в организационной структуре предприятия.

#Проект – система понятий, дающая абстрактное представление об изделии в виде совокупности свойств и особенностей материального объекта. Совокупность этих свойств получают в результате синтеза и реализации творческого и исполнительского замысла.

#Проектирование – творческая деятельность в области абстракции в определении совокупности свойств и особенностей материального объекта.

#Конструирование – творческий процесс, направленный на определение свойств и особенностей материального объекта.

#Конструкторское проектирование – процесс проектирование в результате которого определяются конструкторские показатели изделий, которые отражаются в КД. Конструкторское проектирование предполагает решение проектно-конструкторских задач.

#Технология РЭС – совокупность методов и средств изготовления готового изделия, отвечающего требованиям нормативно-технической документации.

#Производственный процесс – совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления или ремонта РЭС.

#Технологический процесс (1109 ГОСТ) – часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и/или определению состояния предмета труда.

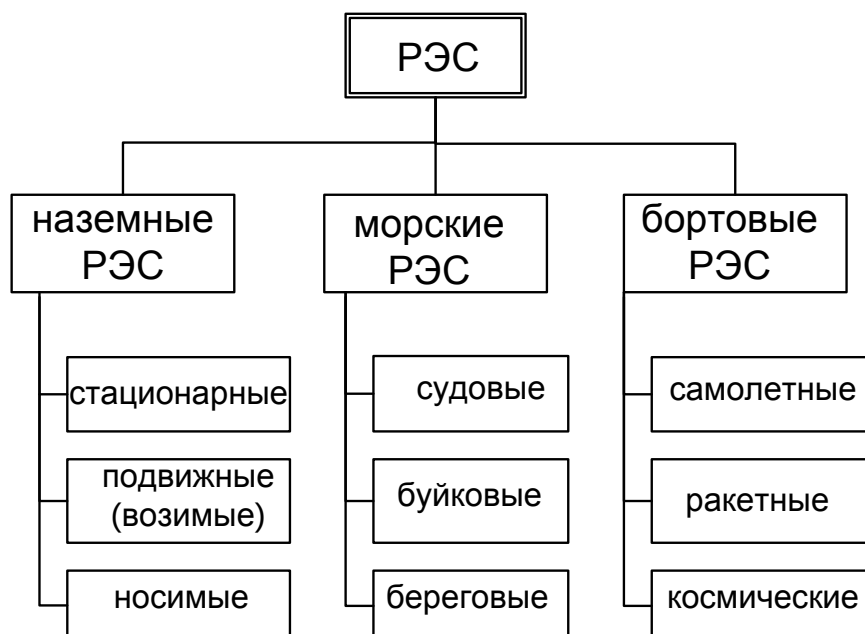
Тема 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭС И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

(10 ч. ЛК, 5 ч. СРС)

Цель конструирования РЭС. Классификация и требования, предъявляемые к конструкциям РЭС.

Основными классификационными признаками РЭС служат классы и группы использования РЭС, конструкторское исполнение, функциональное назначение, функциональная и конструктивная сложность, продолжительность работы, тип элементной базы, тип производства, принципы преобразования сигналов, надежность и др. признаки.

Схема классификации по классам и группам:



Среди наземных РЭС подгруппы стационарных, неподвижных и носимых РЭС включают бытовые и профессиональные РЭС.

Морские и бортовые РЭС являются только профессиональными.

Классификация по конструктивному исполнению:

1. Герметичные;
2. Негерметичные.

В зависимости от организации внутренней структуры конструкции подразделяются на:

1. Разъемные;
2. Книжные;
3. Веерные.

По функциональному назначению:

1. Приемные;
2. Передающие;
3. Приемо-передающие;

4. Преобразователи информации.

По функциональной сложности:

Уровни разукрупнения:

РЭ Системы

РЭ Комплекс

РЭ Устройство

По способу обработки сигнала:

1. Аналоговые;
2. Цифровые;
3. Аналого-цифровые.

По продолжительности работы:

1. Изделия одноразового использования;
2. Изделия многократного использования;
3. Изделия непрерывного использования.

По надежности:

1. С резервированием;
2. Без резервирования.

В зависимости от условий эксплуатации и категорий размещения бытовые РЭС подразделяются на 4 группы конструктивного исполнения:

1. РЭС для жилых помещений
2. РЭС, автомобильные радиовещательные и приемные
3. РЭС, носимые (переносные), работающие на открытом воздухе
4. РЭС, работающие на открытом воздухе в условиях движения

Наземные профессиональные РЭС (группы к.и.).

1. Стационарные РЭС, работающие в наземных и подземных отапливаемых помещениях.
2. Стационарные РЭС, работающие на открытом воздухе или вне отапливаемых наземных и подземных сооружений.
3. Возимые РЭС, устанавливаемые на автомобили, мотоциклы, сельскохозяйственную и строительную технику и работающие на ходу.
4. Возимые РЭС, устанавливаемые во внутренних помещениях судов, работающие на ходу.
5. Возимые РЭС, устанавливаемые на подвижных железнодорожных объектах, работающие на ходу.
6. Носимые и портативные РЭС, предназначенные для длительной перевозки на открытом воздухе и в неотапливаемых помещениях, работающие на ходу.
7. Портативные РЭС, предназначенные для переноски при облегченных внешних воздействиях или отапливаемых подземных или наземных сооружениях.

Измерительная аппаратура: ГОСТ 061.78

ГОСТ 21552.84	}	Требования к вычислительной технике
ГОСТ 20397.82		
ГОСТ 15151.69	}	Работа с радиацией, со специальным оборудованием, морская РЭА (от -50° до $+50^{\circ}$); бортовая (от -60° до $+85^{\circ}$)
ГОСТ 17412.72		

Судовые РЭС (по к.и.):

1. Расположенные во внутренних помещениях судна.
2. Предназначенные для работы на открытых палубах.

На самолетных и вертолетных РЭС группы исполнения устанавливаются в зависимости от конкретных видов воздействия:

По уровню вибрационных воздействий существует 7 групп к.и.

По воздействию влажности – 2 группы:

1. защищена от наружного воздуха;
2. контакт с воздухом.

По воздействию пониженного давления – 4 группы:

1. для низколетящих самолетов, до 6 000 м;
2. местных линий, до 10 000 м;
3. для ...ных самолетов, до 15 000 м;
4. для сверхзвуковых самолетов, до 25 000 м.

По воздействию ударов – 3 группы:

1. центральная зона размещения;
2. концевая зона для дозвуковых самолетов;
3. концевая зона для сверхзвуковых самолетов.

По воздействию тепловых воздействий – 3 группы:

1. РЭА в отсеках с регулируемой температурой;
2. РЭА с нерегулируемой температурой;
3. РЭА в двигательных отсеках.

По механическим воздействиям:

1. фюзеляжная область: 1А – в центральной части;
1Б – вблизи винтов и двигателей;
1В – амортизированная аппаратура;
2. Хвостовая зона: 2Г – хвостовое оперение;
3. Зона двигателей: 3Е – на двигателе;
3Ж – вблизи двигателя.

Дестабилизирующие факторы эксплуатации РЭС.

Условно можно разделить на 3 группы:

1. Факторы внешней среды (климатические).

2. Факторы, связанные с объектом установки (механические).

Климатические факторы.

1. Повышенная температура. Приводит к:

- высыханию защитных покрытий с деформацией и растрескиванием,
- миграции примесей в полупроводниковых приборах,
- изменению электрических характеристик радиоэлементов,
- деформации сопряженных деталей с различными тепловыми коэффициентами,
- повышению интенсивности отказов.

2. Пониженная температура.

- конденсация влаги,
- изменение электрических характеристик РЭ,
- деформация сопряженных деталей.

3. Повышенная влажность.

- химические реакции в растворах в составе адсорбированной влаги приводит к электролизу и коррозии.

4. Термудар.

- механические напряжения в местах пайки и других соединений.
- растрескивание металлических и неметаллических покрытий.

5. Пониженное атмосферное давление.

- снижение электрической прочности воздуха.
- снижение эффективности теплообмена с окружающей средой.

Кроме рассмотренных факторов, нормируются и другие виды воздействий внешней среды:

- пыль,
- солнечная радиация и др. радиация (космическая, ядерная),
- гидростатическое давление.

Нормальные условия:

Температура: **+15 ÷ +35 °C**

Влажность: **45÷75 %**

Атмосферное давление: **86÷104 кПа(650-808 мм.рт.ст.)**

Виды климатического исполнения РЭС.

В соответствии с ГОСТ 15150-69 предусмотрены 9 видов климатического исполнения:

1. 'У' – для районов с умеренным климатом, среднегодовая температура +40 ÷ -45 °C.
2. 'УХЛ' – для районов с умеренным и холодным климатом, минимальная температура ниже -45 °C.

3. 'ТВ' – тропический влажный климат с температурой $+20^{\circ}\text{C}$ и выше, в сочетании с влажностью 80 % и выше, действующих на изделие больше половины суток в течение двух и более месяцев.
4. 'ТС' – тропический сухой климат. Температура $+40^{\circ}\text{C}$ и выше. (Те районы, которые не относятся к 'ТВ')
5. 'М' – для районов с умеренно холодным морским климатом, включая моря, океаны и прибрежные зоны, расположенные севернее 30° с.ш. и южнее 30° ю.ш.
6. 'О' – общеклиматическое исполнение для суши (Антарктида не входит).
7. 'ОМ' – общеклиматическое морское исполнение для судов с неограниченным районом плавания.
8. 'В' – всеклиматическое исполнение (кроме Антарктиды).

Аппаратура, предназначенная для работы в Антарктиде разрабатывается и исполняется по специальным заказам.

Категории размещения РЭС на объектах.

В соответствии с ГОСТ 15150-69 предусмотрены следующие категории размещения:

1. Для эксплуатации на открытом воздухе.
2. Для эксплуатации под навесом и на объектах, где колебания температуры и влажности несущественно отличаются от открытого воздуха.
3. Для эксплуатации в закрытых помещениях при естественной вентиляции без кондиционирования.
4. Для эксплуатации в помещениях с искусственным климатом.
5. Для эксплуатации с повышенной влажностью (подвалы, шахты, трюмы).

Требования к РЭА:

Требования, предъявляемые к РЭА.

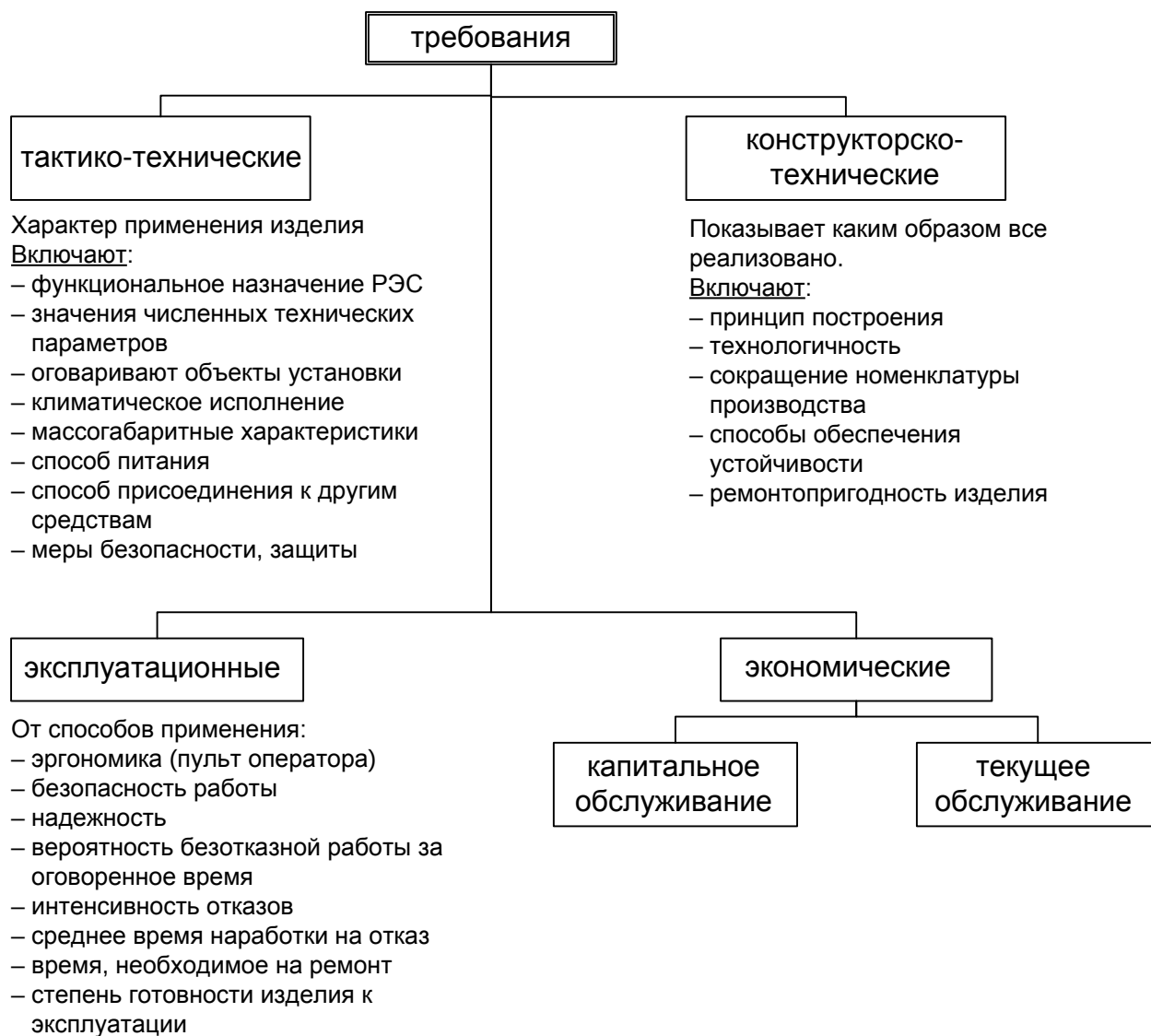
Исходным документом при разработке РЭА является ТЗ. Содержание и структура ТЗ определяется ГОСТ 15001-88.

Требования к конструкции излагаются в разделе 5 ТЗ – технические (тактико-технические) требования.

Требования, предъявляемые к конструкции:

1. Требования к составу РЭА.
2. Требования к конструкции (включая массу и габариты).
3. Требования к показателям назначениям (функциональные показатели).
4. Требования к устойчивости к механическим и климатическим воздействиям.
5. Требования к надежности.
6. Требования к эргономике и технической эстетике.
7. Требования к технологичности и унификации.
8. Патентно-правовые требования.
9. Требования к безопасности РЭА.
10. Требования к ЭМС и уровням промышленных помех.
11. Требования к техобслуживанию и ремонту.

Каждое из требований представляет собой подраздел раздела 5 ТЗ.



Тактико–технические характеристики: мощность, частота и т.д.

Параметры конструкции РЭС.

Параметры конструкции РЭС – это количественное выражение свойств конструкций. Свойства конструкций определяются деталями и связями между ними. Параметры конструкций принято классифицировать в соответствии со следующей схемой.

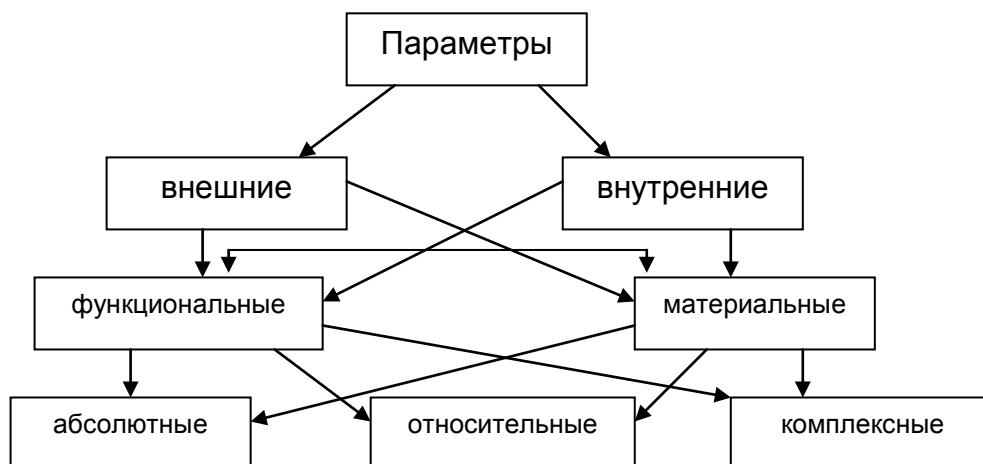


Схема 1. Параметры конструкций.

Внешние и внутренние параметры РЭС.

#Внешние – характеризуют внешние свойства конструкции РЭС, и относятся к внешним связям изделия.

#Внутренние – обеспечивают значения внешних параметров, т.е. характеризуют те средства, с помощью которых обеспечиваются внешние параметры.

Абсолютные параметры конструкций.

#Абсолютные параметры – это параметры, характеризующие внешние и внутренние связи конструкции, выражаемые одной физической величиной. К ним относятся внешние, внутренние, функциональные и материальные параметры.

Например – выходная мощность, потребляемый ток, входное сопротивление.

Относительные параметры конструкций РЭС.

#Относительные параметры представляют собой нормированные значения абсолютных параметров.

Относительные параметры широко используются при оценочных расчетах массогабаритных характеристик РЭС на ранних стадиях разработки.

Относительные параметры:

1. m_0 – плотность конструкции $\left[\frac{кг}{м^3} \right]$;
2. γ – плотность упаковки элементов $\left[\frac{1}{м^3} \right]$;
3. q_m – коэффициент дезинтеграции массы;
4. q_v – коэффициент дезинтеграции объема;
5. q_s – коэффициент дезинтеграции площади.

1. Плотность конструкции.

$m_0 = \frac{m_k}{V_k}$ — плотность конструкции используется при оценке качества конструкции. Чем больше плотность конструкции, тем выше качество конструкции (при условии, что максимальная плотность достигнута за счет максимального объёма конструкции).

При разработке РЭС существует тенденция создавать т.н. тонущие конструкции. ($m_0 > 1 \frac{кг}{м^3}$), однако для большинства конструкций плотность меньше 1.

При известном значении плотности конструкции через массу можно найти объем конструкции и наоборот.

Значение плотности конструкции табулируется.

2. Плотность упаковки элементов.

Это количество элементов в единице объема:

$$\gamma = \frac{N_{эл}}{V_k}.$$

Под $N_{эл}$ понимается число эквивалентных дискретных элементов.

$$N_{эл} = N_{ИЭ} + N_{ДЭ}$$

Плотность упаковки применяется для:

а) Оценки качества конструкции (чем больше γ , тем выше качество конструкции).

Для полупроводниковых технологий: $\gamma = 1,5 \div 3 \left[\frac{1}{\text{см}^3} \right]$.

На интегральных схемах: $\gamma = 5 \div 10 \left[\frac{1}{\text{см}^3} \right]$.

Современная аппаратура: $\gamma \gg 10 \left[\frac{1}{\text{см}^3} \right]$.

б) $\gamma^{-1} = k_{0V}$ – коэффициент связи интегрального и функционального показателя.

в) Оценочные расчеты массогабаритных показателей конструкции на ранних стадиях разработки. Зная плотность упаковки элементов, можно найти массу конструкции.

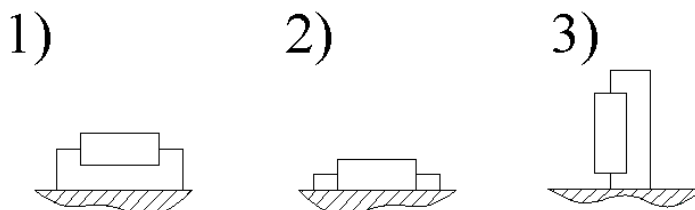
3. Коэффициенты дезинтеграции.

Это безразмерные величины, показывающие потерю массы площади и объема при создании конструкции относительно массы, установочного объема и установочной площади радиоэлементов.

$$q_m = \frac{m_k}{m_{эл}}; \quad q_s = \frac{S_k}{S_{эл}}; \quad q_v = \frac{V_k}{V_{эл}}$$

В соотношениях для q_s и q_v используются понятия установочной площади и установочного объема.

Виды установки:



Для идеальных конструкций $q_m = q_s = q_v = 1$.

Коэффициенты q_m и q_v применимы для конструкций любого типа, а q_s применим только для конструкций планарного типа. Значения коэффициентов являются табличными.

Применение коэффициентов дезинтеграции:

а) Оценка качества конструкции (чем меньше коэффициенты, тем выше качество).

б) Оценочные расчеты массогабаритных показателей на начальных стадиях разработки. По заданным характеристикам элементной базы через коэффициенты дезинтеграции можно рассчитать массу, объем и площадь конструкции.

Относительные параметры конструкции могут быть использованы и при сравнительной оценке качества изделий.

Плотность конструкции и плотность упаковки могут применяться для сравнительной оценки качества любых конструкций.

Коэффициенты дезинтеграции могут быть использованы при сравнительной оценке качества конструкций только одного поколения. Это обусловлено тем, что в выражения для коэффициентов дезинтеграции входят характеристики элементной базы.

Другие относительные параметры конструкции.

К этим параметрам относятся параметры, характеризующие тепловой режим изделий.

Поверхностная плотность теплового потока:

$$P_{0s} = \frac{P}{S_T} \left[\frac{Вт}{м^2} \right], \text{ где}$$

P – тепловой поток, рассеиваемый изделием;
 S_T – площадь поверхности теплообмена.

Объемная плотность теплового потока.

$$P_{0v} = \frac{P}{V_K} \left[\frac{Вт}{м^3} \right], \text{ где}$$

P – тепловой поток, рассеиваемый изделием;
 V_K – объем поверхности теплообмена.

Поверхностная и объемная плотность теплового потока используется при выборе способа охлаждения.

$P_{0s} \leq 0,02 \left[\frac{Вт}{см^2} \right] \quad P_{0v} \leq 30 \left[\frac{Вт}{см^3} \right]$ – для конструкций с естественным воздушным охлаждением.

Взаимосвязь функциональных и материальных параметров.

#Функциональные параметры – все энергетические и энергоинформационные параметры конструкции.

#Материальные параметры характеризуют материальные затраты с помощью которых обеспечиваются функциональные параметры.

Функциональные параметры материализуются в результате определения материальных вложений.

К материальным параметрам принято относить массогабаритные характеристики конструкции, показатели надежности и стоимость.

Связь между функциональными и материальными параметрами.

Зависимость функциональных параметров от материальных в общем виде может быть представлена:

$M_j = f(F_1, F_2, \dots, F_n)$, где F_i – значения функциональных параметров, M_j – значение j -го материального параметра.

Получить такую зависимость аналитически невозможно.

С позиции связи функциональных и материальных показателей все конструкции можно разделить на 2 класса.

1. Конструкции с доминирующим функциональным показателем (это показатель, который определяет материальные параметры конструкций).
2. Характерна равнозначность всех функциональных показателей конструкций по отношению к материальным.

Для конструкции 1-й группы:

$$M_j = f(F_i) = k_0 \cdot F_i,$$

где F_i – доминирующий функциональный показатель,
 k_0 – коэффициент связи функциональных и материальных показателей.

$$k_0 = \frac{M_j}{F_i}.$$

К первой группе можно отнести: усилители мощности и вторичные источники питания (выходная мощность).

Ко второй группе относятся вычислительные устройства.

Знание коэффициентов связи функциональных и материальных показателей даёт возможность на ранних стадиях разработки через заданные функциональные показатели оценить ожидаемые материальные, и наоборот.

Определение коэффициентов связи функциональных и материальных показателей.

Для определения коэффициентов связи функциональных и материальных показателей используются два подхода:

1. Базируется на статистических данных о показателях того или иного класса конструкции.
2. Основан на использовании аналитических зависимостей, связывающих функциональные и материальные показатели конструкции.

При использовании первого подхода коэффициент связи (k_0) представляет собой отношение математических ожиданий материальных показателей и доминирующих функциональных показателей.

Для вторичных источников питания могут быть определены следующие коэффициенты связей:

$$k_{0m} = \frac{m_k}{P_{вых}} \left[\frac{кг}{вт} \right],$$

$$k_{0V} = \frac{V_k}{P_{вых}} \left[\frac{дм^3}{вт} \right],$$

$$k_{0C} = \frac{C_k}{P_{вых}} \left[\frac{руб}{вт} \right].$$

Для изделий с отсутствующим доминирующим функциональным показателем определение коэффициента связи осуществляется через интегральный функциональный показатель.

В качестве такого показателя часто используется количество элементов в изделии. Этот подход базируется на предпосылке, что чем сложнее функции, тем большее количество радиоэлементов необходимо задействовать для реализации этих функций.

$N_{эл} = N_{ИЭ} + N_{ДЭ}$ – интегральный функциональный показатель.

$$k_{0m} = \frac{m_k}{N_{эл}}; \quad k_{0V} = \frac{V_k}{N_{эл}}; \quad k_{0C} = \frac{C_k}{N_{эл}}$$

$$\frac{N_{эл}}{V_k} = \gamma \text{ – плотность упаковки элементов.}$$

Коэффициент k_{0V} может рассматриваться как коэффициент связи объема конструкции и функционального показателя.

Методы комплексной оценки качества РЭС.

При сравнительной оценке качества конструкции по отдельным параметрам и при большом количестве таких параметров могут возникать трудноразрешимые ситуации.

При сравнительной оценке качества конструкции используются комплексные (интегральные) параметры, которые позволяют получить оценку качества по

совокупности отдельных (дифференциальных) параметров, в число которых могут входить внешние и внутренние, функциональные и материальные, абсолютные и относительные.

На практике находят применение следующие комплексные оценки:

1. Сложность конструкции.
2. Стоимостной комплексный показатель.
3. Показатель в виде суммы нормированных взвешенных дифференциальных параметров.

1. Сложность конструкции (применяется не часто):

$$C_{\text{Л}} = \beta_1 N_{\text{ЭЛ}} + \beta_2 N_{\text{МС}}, \text{ где}$$

$N_{\text{ЭЛ}}$ – количество элементов в изделии,

$N_{\text{МС}}$ – количество электрических межсоединений,

β_1 – коэффициент сложности (выражается количеством элементов и соединений)

β_2 – коэффициент сложности (выражается в единицах массы, объема и стоимости)

2. Стоимостной комплексный показатель.

Представляет собой оценку стоимости выполнения элементарной логической операции, применяется при выборе цифровых ИС.

$$C_1 = \frac{C_{\text{Э}}}{F_{\text{П}} \Phi T_{\text{Э}}}, \text{ где}$$

$C_{\text{Э}}$ – эксплуатационная стоимость ИС;

$F_{\text{П}}$ – частота переключения ИС;

Φ – число логических операций, выполняемых логическим элементом за одно переключение;

$T_{\text{Э}}$ – время эксплуатации ИС в составе изделия.

$$C_{\text{Э}} = C_{\text{ис}} + C_{\text{э}} + C_{\text{тр}} + C_{\text{об}} + C_{\text{р}}, \text{ где}$$

$C_{\text{ис}}$ – стоимость интегральной схемы;

$C_{\text{э}}$ – стоимость энергии, расходуемой интегральной схемой за время эксплуатации;

$C_{\text{тр}}$ – стоимость транспортировки ИС в составе изделия;

$C_{\text{об}}$ – стоимость обслуживания ИС в составе изделия;

$C_{\text{р}}$ – стоимость ремонта изделия, пересчитанная на стоимость ремонта одной ИС.

При выборе ИМС не поощряется запас по быстродействию, поэтому

$$F_{\text{П}} = F_{\text{ПТ}} = 1/\tau_3, \text{ где}$$

$F_{\text{ПТ}}$ – требуемая частота переключения;

τ_3 – время задержки.

$$\Phi = m \cdot n, \text{ где}$$

m – коэффициент объединения ИС по входу;

n – коэффициент разветвления ИС по выходу.

$$T_{\text{Э}} = \frac{n_{\text{р}} + 1}{N \cdot \lambda_{\text{ис}}}, \text{ где}$$

$n_{\text{р}}$ – количество ремонтов аппаратуры за время эксплуатации;

N – количество ИМС в изделии;

$\lambda_{\text{ис}}$ – интенсивность отказов ИС в составе изделия.

Аппаратура, выполненная на современных ИМС, имеет высокую надежность и среднее время наработки на отказ превышает ресурс объекта, где используется аппаратура, поэтому

$$T_9 = \frac{1}{N \cdot \lambda_{ИС}} = T_0 - \text{среднее время наработки на отказ.}$$

$C_{\varepsilon} = C_{\varepsilon 1} \cdot P_{ис} \cdot T_9$, где

$C_{\varepsilon 1}$ – единица электроэнергии;

$P_{ис}$ – мощность, потребляемая ИС.

$C_{тр} = C_{тр 1} \cdot m_{ИС} \cdot T_9$, где

$C_{тр 1}$ – стоимость транспортировки единицы массы в единицу времени;

$m_{ИС}$ – масса ИС.

Для аппаратуры искусственных спутников земли (ИСЗ):

$$C_E = C_{PI} \cdot P_{ИС}$$

$$C_{TP} = C_{3I} \cdot m_{ИС}, \text{ где}$$

C_{PI} – стоимость единицы мощности;

C_{3I} – стоимость запуска.

Стоимость обслуживания ИМС в составе изделия значительно превышает другие показатели стоимости, т.к. в нее входит стоимость помещения и оборудования:

$$C_{об} \gg C_{ис} + C_E + C_{тр} + C_p.$$

Исходя из этого, составляющая эксплуатационной стоимости ИС ($C_{об}$) не рассматривается, чтобы не потерять другие составляющие стоимости. К тому же стоимость обслуживания мало зависит от типа ИС.

С учетом того, что $nP = 0$ и, следовательно, $C_p = 0$, стоимость эксплуатации ИС:

$$C_э = C_{ис} + C_E + C_{тр},$$

следовательно, формула для стоимостного показателя принимает вид:

$$C_1 = \frac{\tau_3}{m \cdot n} \cdot N \cdot \lambda_{ИС} (C_{ИС} + C_E + C_{TP})$$

Самолетная РЭА:

$$C_{TI} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ руб/г} \cdot \text{час};$$

$$C_{EI} = 0,04 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}.$$

Автомобильная РЭА:

$$C_{TI} = 4,74 \cdot 10^{-7} \text{ руб/г} \cdot \text{час};$$

$$C_{EI} = 0,04 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}.$$

Аппаратура ИСЗ:

$$C_{3I} = 1 \text{ руб/г};$$

$$C_{EI} = 10 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}.$$

При питании от солнечных батарей

$$C_{3I} = 1 \text{ руб/г};$$

$$C_{PI} = 250 \text{ руб/Вт}.$$

3. Показатель в виде суммы взвешенных нормированных дифференциальных параметров.

$$Q = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \alpha_i^*, \text{ где}$$

n – число дифференциальных параметров, по которым производится оценка;

φ_i – весовой коэффициент;

α_i^* – нормированное значение i-го дифференциального параметра.

При составлении оценки Q решаются следующие задачи:

1. Выравнивание влияния дифференциальных показателей на качество объекта.
2. Нормирование дифференциальных показателей качества.
3. Выбор весовых коэффициентов.

Выравнивание влияния дифференциальных показателей на качество объекта состоит в приведении этого влияния к одной тенденции (повышения/понижения качества).

Выравнивание производится заменой дифференциальных параметров, выпадающих из общей тенденции, обратными величинами. В случае приведения влияния дифференциальных параметров к тенденции повышения – лучший вариант выбирается по max значению Q, иначе по min Q.

Нормирование дифференциальных показателей качества.

Необходимо для исключения размерности дифференциальных параметров и может быть выполнено по следующим схемам:

$$a) \alpha_i^* = \frac{\alpha_i}{\alpha_{i\max}} \quad +$$

$$б) \alpha_i^* = \frac{\alpha_i}{\alpha_{iTЗ}} \quad -$$

$$в) \alpha_i^* = \frac{\alpha_{i\max} - \alpha_i}{\alpha_{i\max}}, \quad +$$

где $\alpha_{i\max}$ – максимальное значение параметра;

$\alpha_{iTЗ}$ – значение параметра, заданное по ТЗ.

Преимущество схемы в) – исключение из рассмотрения max значения α_i , выпадающего по своей величине из ряда α_i .

Выбор весовых коэффициентов.

Производится методом экспертных оценок:

Группа экспертов высказывает свое мнение по оценке веса каждого из дифференциальных параметров. Мнения группы экспертов обрабатываются методом ранговой корреляции *для снижения роли субъективного фактора*. (Субъективный фактор является существенным недостатком данного метода)

Весовые коэффициенты назначаются в одно-, десяти-, ста- и т.д. бальных системах, т.е.

$$\sum \varphi_i = 1, 10, 100, \dots$$

Пример: Расчет комплексного показателя качества.

Сравнить две конструкции по плотности конструкции, коэффициентам дезинтеграции, стоимости.

1) Значения параметров приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Вариант конструкции	$m_0, \text{кг/м}^3$	q_m	q_v	$C, \text{руб.}$
1	0,85	1,55	2,02	4000
2	0,60	2,36	2,91	2350
3	0,78	1,83	2,45	3200

2) Выравнивание влияния дифференциальных показателей на качество объекта:

заменим стоимость конструкции и коэффициенты дезинтеграции на обратную величину:
Таблица 2.2.

Вариант конструкции	$m_0, \text{кг/м}^3$	$1/q_m$	$1/q_v$	$1/C, 1/\text{руб.}$
1	0,85	0,645	0,495	$25 \cdot 10^{-5}$
2	0,60	0,424	0,344	$42,5 \cdot 10^{-5}$
3	0,78	0,546	0,408	$31,25 \cdot 10^{-5}$

3) Нормирование дифференциальных показателей качества произведем по формуле:

$$\alpha_i^* = \frac{\alpha_i}{\alpha_{i\max}},$$

после чего получим:

Таблица 2.3.

Вариант конструкции	α_{m0}	α_{qm}	α_{qv}	α_C
1	1	1	1	0,5875
2	0,71	0,657	0,694	1
3	0,92	0,846	0,824	0,7344

4) Выбор весовых коэффициентов.

Важность по убыванию: стоимость, плотность конструкции, коэффициенты дезинтеграции (массовое производство).

Обоснование выбора весовых коэффициентов:

$$\sum_{i=1}^4 \varphi_i = 10 \quad \varphi_1 = 4.5 \quad \varphi_2 = 3.5 \quad \varphi_3 = \varphi_4 = 1$$

Таблица 2.4.

φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
3,5	1,0	1,0	4,5

5) Произведем расчет комплексного показателя качества:

$$Q_1 = 3.5 \cdot 1 + 1.0 \cdot 1 + 1.0 \cdot 1 + 4.5 \cdot 0.5875 = 8.14$$

$$Q_2 = 3.5 \cdot 0.71 + 1.0 \cdot 0.657 + 1.0 \cdot 0.694 + 4.5 \cdot 1 = 8.34$$

$$Q_3 = 3.5 \cdot 0.92 + 1.0 \cdot 0.846 + 1.0 \cdot 0.824 + 4.5 \cdot 0.7344 = 8.19$$

Выбираем второй вариант конструкции.

Комплексная оценка является универсальной. С помощью этой оценки можно выбирать радиоэлементы, материалы, конструкции и любое другое техническое решение.

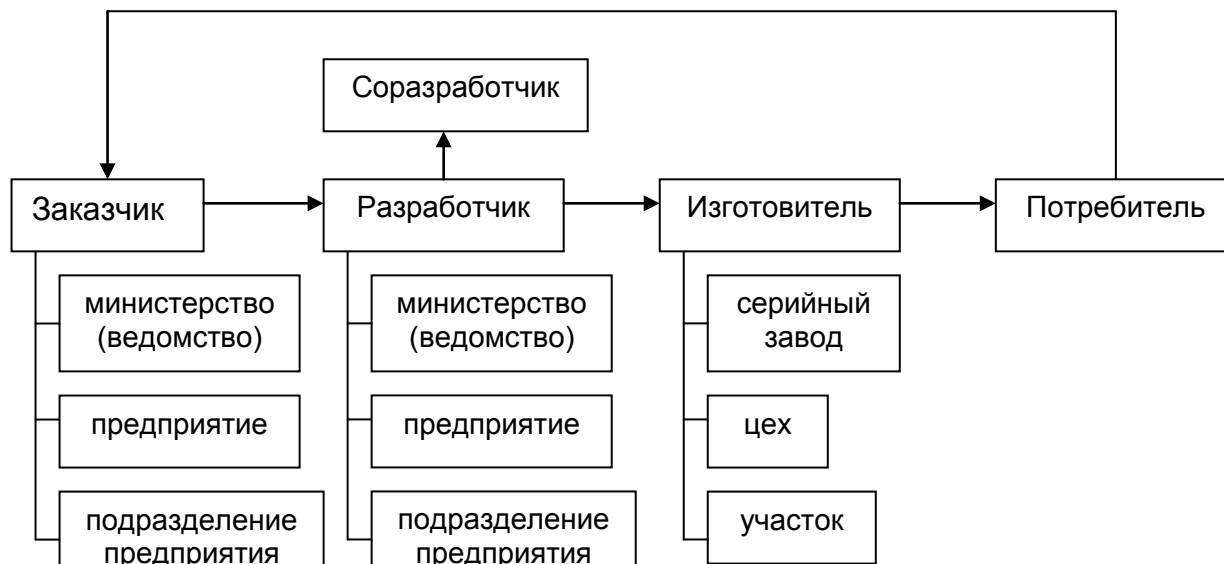
Стадии разработки РЭС.

Разработка технологических документов.

В разработке РЭС принимают участие следующие организации:

- заказчик;
- разработчик;
- изготовитель;
- потребитель.

Их взаимодействие может быть представлено в виде следующей схемы:



Заказчик совместно с будущим потребителем разрабатывает “заявку на разработку”, которая по форме напоминает ТЗ.

Разработчик, совместно с заказчиком составляет ТЗ, которое утверждается заказчиком.

Разработчик после утверждения ТЗ заключает договор с заказчиком (и соразработчиками). Договор является юридическим документом, в котором оговариваются условия и стоимость, порядок финансирования разработки, ответственность сторон. К договору прилагается календарный план и плановая калькуляция.

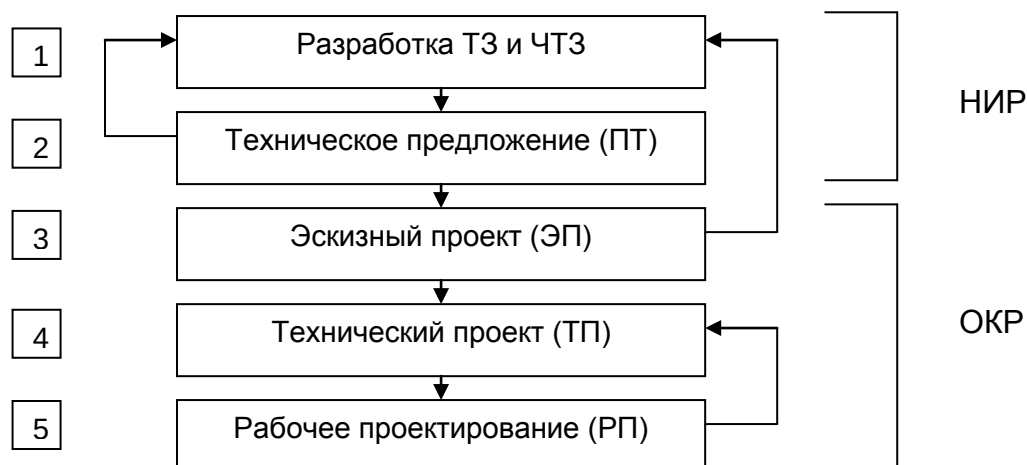
Разработчик разрабатывает конструкции (комплект КТД), изготовитель, на основе документации, изготавливает изделие и передает его потребителю, который эксплуатирует изделие и передает информацию по надежности изделия заказчику и разработчику.

Разработка изделия разбивается на 5 стадий, на каждой из которых решаются определенные задачи.

Разработка разбивается на 5 стадий:

1. Техническое задание (ТЗ).
2. Техническое предложение (ТП).
3. Эскизное проектирование (ЭП).
4. Техническое проектирование (ПТ).
5. Рабочее проектирование (РП).

Стадии разработки РЭС:



ТЗ содержит следующие разделы:

1. Наименование и область применения изделия.
2. Основание для разработки.
3. Источники разработки.
4. Конструкторские аналоги.
5. Технические требования.
6. Требования к транспортировке и хранению.
7. Требования к стандартизации и унификации.
8. Дополнительные требования.
9. Условия приемки изделия.
10. Комплектность документации.
11. Приложение.

ТЗ разрабатывается на все изделие, ЧТЗ – на составные части изделия, структура ЧТЗ такая же, как ТЗ.

Стадии 'Разработка ТЗ' и 'Техническое предложение' называют стадиями НИР (научно-исследовательские разработки), последующие стадии называются ОКР (опытные конструкторские разработки).

Техническое предложение (ПТ).

#Техническое предложение – это совокупность текстовых и графических документов, содержащих оценку возможности и целесообразности выполнения разработки в соответствии с ТЗ.

На этой стадии определяются пути решения задачи, рассматриваются различные варианты решения с их оценкой и выбирается оптимальный вариант.

Результатом разработки технического предложения может стать вывод о нецелесообразности или невозможности выполнения разработки с заданными требованиями. В этом случае пересматривается ТЗ и ЧТЗ.

Документации технического предложения присвоена литера 'П'.

Эскизное проектирование.

#Эскизное проектирование (ЭП)– это работы по выпуску текстовых и графических документов, содержащих структурные и функциональные электрические схемы ИВТ, принципиальные электрические схемы основных или определяющих узлов, результаты лабораторной доработки этих узлов, включая испытания макетов, предварительные расчетно-экспериментальные данные по конструктивному исполнению узлов и изделий на выбранной элементной базе, решение вопросов обеспечения надежности ИВТ.

Документации эскизного проекта присваивается литера 'Э'.

Техническое проектирование (ТП).

#Техническое проектирование является завершающей стадией разработки проектно-конструкторских документов.

Техническое проектирование содержит:

- обоснование окончательных структурных, функциональных и принципиальных электрических решений,
- обоснование конструкторско-технологического варианта выполнения изделий,
- расчёты надежности изделия.

Расчетные данные подтверждаются результатами макетирования изделия и лабораторно-отрабочных испытаний.

На этой стадии разрабатываются первые варианты ТУ на изделие. ТУ по структуре не отличается от ТЗ, но составляется на произведенное изделие с записью значений показателей, которые должны выполняться в процессе эксплуатации изделий.

Документации ТП присваивается литера 'Т'.

На стадии ТП выполняется макетный образец изделия и на опытном производстве предприятия-разработчика может быть изготовлен опытный образец изделия. Все это предъявляется заказчику.

Рабочее проектирование.

В зависимости от масштаба производства, стадия рабочего проектирования имеет несколько подстадий.

- Разрабатывается рабочая документация на опытный образец.

В состав рабочей документации входит полный комплект КТД для изготовления опытного образца или опытной партии.

- Изготавливается опытный образец или опытная партия, и производятся доводочные испытания опытного образца (партии) по жесткой программе на стендах, имитирующих реальные условия эксплуатации. По результатам испытаний корректируется КТД с присвоением литеры 'О'(опытный образец).

По скорректированной документации изготавливается следующий опытный образец (партия), который после предварительных испытаний в ОТК завода и приемо-сдаточных испытаний представителям заказчика на заводе поступает на приемочные (ведомственные, меж ведомственные, государственные испытания).

Приемочные испытания проводятся в реальных условиях эксплуатации для бортовой аппаратуры – это летные испытания.

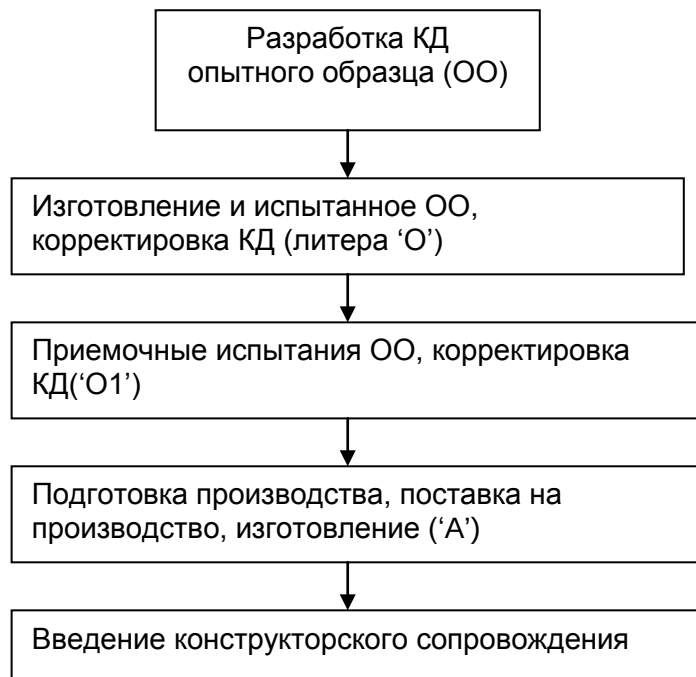
По результатам этих испытаний производится корректировка документации с присвоением литеры 'О1'.

Если изделие не проходит государственных испытаний, оно возвращается на завод для доработки (изделия и документации) с присвоением документации литеры 'О2'.

Положительные результаты испытаний опытного образца (партии) служат основанием присвоению документации литеры 'А' (может использоваться при производстве изделий).

Рабочая документация установившегося производства – литера 'Б'.

В задачи разработчика в условиях установившегося производства входит авторское сопровождение изделия до конца жизненного цикла.



Состав конструкторской документации на стадиях разработки изделия.

Шифр доку-мента	Наименование документа	ПТ	ЭП	ТП	Рабочая документация			
					детал и	СБ	компл ексы	компл- лекты
–	Чертеж детали			+	‡	-	-	-
СБ	СБ чертеж	-	-	-	-	‡	-	-
ВО	Чертеж общего вида	+	+	‡	-	-	-	-
ГЧ	Габаритный чертеж	+	+	+	+	+	+	-
МЧ	Монтажный чертеж	-	-	-	-	+	+	-
Э1,Э2,Э3	Схемы	+	+	+	-	+	+	+
–	Спецификация	-	-	-	-	‡	‡	‡
ПЗ	Пояснительная записка	‡	‡	‡	-	-	-	-
ТУ	ТУ				+	+	+	+
ПТ	Ведомость технического предложения	‡	-	-				
ЭП	Ведомость эскизного проекта	-	‡	-				
ТП	Ведомость технического проекта	-	-	‡				

- необязательная документация, документ не с оставляют

‡ обязательная документация,

+ по согласованию с заказчиком.

Ведомость xxx- текстовый табличный документ, в котором перечислены все документы, разработанные на соответствующей стадии проектирования.

Многоуровневый принцип построения РЭС. Элементная база РЭС. Этапы развития элементной базы и конструкций РЭС. Интегральная схема (ИС), микросборка (МСБ), функциональный узел, блок, устройство, комплекс, система.

#Система – организованная совокупность средств, предназначенных для решения сложной задачи.

Различают большие и малые системы.

Любая система состоит из подсистем, которые занимают в пределах системы определенный уровень.

Положение подсистем в пределах системы характеризуется рангом подсистемы (обозначаем числом от нуля и выше).

Любой системе нужно три признака системности:

1. Наличие иерархии в пределах системы.
2. Композиция.
3. Декомпозиция.

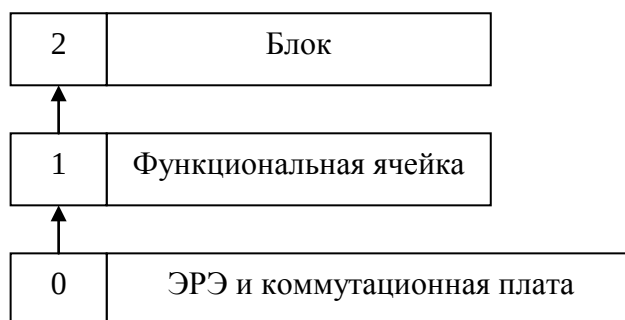
#Композиция – это свойство систем, которое характеризует возможность получения новых свойств в результате объединения подсистем, каждая из которых обладает некоторыми свойствами. Свойства систем не равны сумме свойств подсистем.

#Декомпозиция – это возможность выделить в системе каждую из составляющих подсистем с её свойствами.

Положение подсистемы к системе определяется рангом или уровнем подсистемы.

Низший ранг – 0, 1, 2 ..

Конструкция ИВТ представляет собой систему:



Внешние и внутренние параметры подсистем, составляющих систему, находятся в определенной взаимосвязи.

Внешние параметры подсистемы ранга n являются внутренними параметрами подсистемы ранга $n + 1$ и наоборот.

Многоуровневый принцип построения РЭС.

Опираясь на представление о РЭС, как о системе, при её построении используется многоуровневый принцип, т.е. РЭС разукрупняется.

Задачи разукрупнения относятся к схемотехническим и решаются при разработке электрических схем.

В результате, электрическая схема разбивается на конструктивно-технологические единицы (КТЕ), которые воплощаются в дальнейшем конструктивном решении.

КТЕ самого низкого структурного уровня считается основной КТЕ.

Разукрупнение производится на основе функционального или конструктивного признака.

В обоих случаях рассматривается 6 уровней разукрупнения.

При разукрупнении по функциональному признаку:



Функциональный узел – конструктивно и функционально законченное изделие, выполняющее определенные функции по преобразованию сигнала и не эксплуатируется автономно.

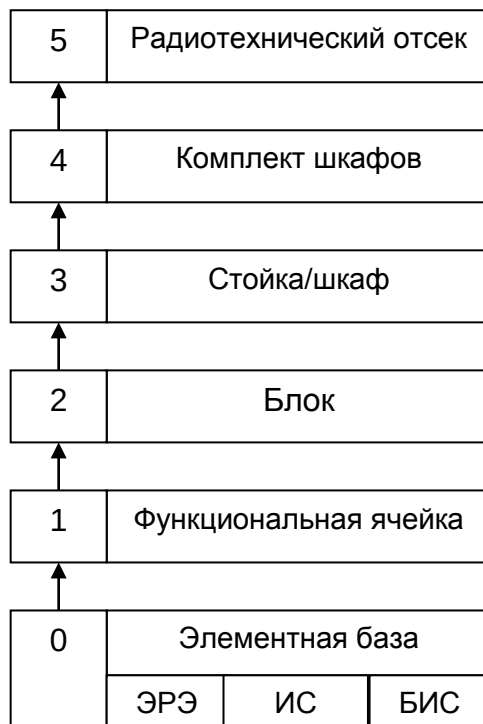
Блок – конструктивно и функционально законченное изделие, состоящие из функциональных узлов и выполняющее достаточные функции по преобразованию сигнала. Не эксплуатируется автономно.

Устройство – это изделие, состоящее из блоков, эксплуатируется автономно.

Комплекс – совокупность устройств.

Система – совокупность комплексов.

При разукрупнении по конструктивному признаку рассматривается конструктивное решение на каждом структурном уровне.



Анализ проведенных схем разукрупнения позволяет сделать вывод, что для современных РЭС соответствие уровней в этих схемах нарушается – функциональная и конструктивная сложность изделий в большинстве своем не совпадают.

Принципы разукрупнения:

Независимо от сложности изделия при разукрупнении используется ряд основополагающих принципов:

1. Конструктивная и функциональная законченность КТЕ.
2. Максимальная функциональная сложность КТЕ на нижних уровнях.
3. Минимальное число выводов КТЕ.
4. Конструктивно-технологическая совместимость всех КТЕ.
5. ЭМС КТЕ.
6. Тепловая совместимость КТЕ.

Перечисленные принципы связаны между собой, так, например, выполнение принципа (1) ведет к (3).

Методы конструирования РЭС.

Методы конструирования:

1. Машиностроительный метод (корпуса),
2. Топологический метод (ПП),
3. Автоматизированный метод (САПР),
4. Эвристический метод.

Существующие методы конструирования подразделяются на три взаимосвязанных группы:

1. Виды связей между деталями:
 - геометрический метод,
 - машиностроительный метод,
 - топологический метод.

2. Способ выявления и организации связей между деталями:
 - метод моноконструкций,
 - функционально-модульный метод,
 - функционально-узловой метод,
 - функционально-блочный метод.
3. Степень автоматизации выявления структуры связей между деталями
 - автоматизированный метод,
 - эвристический метод.

В настоящее время преимущественно используется функционально-узловой метод проектирования. Основной конструкторско-технологической единицей измерения является функциональный узел, который разрабатывается и изготавливается автономно.

Преимущество метода: снижение сроков и стоимости разработки, снижение стоимости изделий, повышение надежности и взаимозаменяемости.

Разновидность метода – базовый метод конструирования, основу которого составляет размерная и функциональная стандартизация, конструктивно-технологических единиц изделий.

Исходя из характеристики функционально узлового метода, можно отметить, что он содержит признаки всех методов конструирования, названных выше.

Роль стандартизации при конструировании РЭС.

Ускорение разработки и производства аппаратуры, увеличение ее серийности, снижение стоимости можно достигнуть унификацией, нормализацией и стандартизацией основных параметров и типоразмеров печатных плат, блоков, приборных корпусов, стоек, широким применением модульного принципа конструирования.

В основе стандартизации модулей и их несущих конструкций лежат типовые функции, свойственные многим электронным системам. Для использования при проектировании модульного принципа конструирования разработаны ведомственные нормали и государственные стандарты, устанавливающие термины, определения, системы типовых конструкций модульных систем.

Конструкционная система, прежде всего, должна представлять многоуровневое семейство модулей с оптимальным составом набора, обеспечивающим функциональную полноту при построении аппаратуры определенного назначения. Все модули системы должны быть совместимы между собой по конструктивным, электрическим и эксплуатационным параметрам.

Стандартизация является необходимым условием обеспечения высокой надежности, снижения стоимости и сроков разработки ИВТ.

Разновидностями стандартизации являются:

- ограничения,
- типизация,
- агрегатирование,
- унификация.

Эти виды стандартизации ставят своей целью введение ограничений на количество вариантов технического решения, обеспечение взаимозаменяемости в изделиях ИВТ.

Этим же целям служит и такой метод стандартизации, как разработка типоразмерных рядов изделий, на основе которых разрабатываются базовые несущие конструкции (БНК).

Назначение каждого из видов стандартизации и её результаты приведены в таблице:

Вид стандартизации	Направление стандартизации	Результаты стандартизации
Ограничения	Терминология ограничений возможных марок сортаментов, размеров и параметров.	Ограничение номенклатуры изделий, разрешенных для использования в разработках ограничительными стандартами.
Типизация	Типовые процессы и методы, рекомендуемые и предпочтительные ряды, базовые конструкции, требования по типизации объектов.	Установление типовых объектов и требований к ним, стандарты на типовые и технологические производства. Руководящие технические материалы: типы, правила, рекомендации, общие ТТ, руководство.
Агрегатирование	Общие ту на группу взаимозаменяемых объектов и стандартизация этих объектов. Стандартизация присоединительных и стыковочных параметров, а также составных частей, используемых в изделиях.	Разработка составных частей изделий и требования по их использованию. Стандарты на присоединяемые размеры, параметры и характеристики составных частей.
Унификация	ТУ на поставляемую продукцию без указания объектов, в которых она должна использоваться. Стандартизация общих норм, параметров, форм, систем, классификации и кодирования.	Создание изделий широкого универсального применения, стандарты и ТУ на конструкции и размеры изделий.

Базовый метод конструирования.

Базовым называется принцип конструирования, при котором частные конструктивные решения реализуются на основе стандартных конструкций модулей или конструктивных систем модулей (базовых конструкций), разрешенных к применению в аппаратуре определенного класса, назначения и объектов установки.

При разработке базовых конструкций должны учитываться особенности современных и, что более важно, будущих разработок. При этом частные конструктивные решения обобщаются, а основные свойства и параметры закладываются в конструкции, которые стандартизуются, поставляются и рекомендуются для широкого применения.

Базовые конструкции не должны быть полностью конструктивно завершенными, необходимо предусматривать возможность их изменения (в основном косметического характера) для создания модификаций аппаратурных решений. Иерархическое построение базовых конструкций с гибкой структурой и числом уровней не более четырех является вполне достаточным для разработки ЭА любой сложности.

При стандартизации параметры конструкций объединяются в *параметрические ряды*, характеризующиеся совокупностью числовых значений на основе принятых градаций и диапазонов. Если в качестве параметров ряда используют геометрические размеры

конструкции, то говорят не о параметрических, а о *размерных рядах*. Оба вида рядов получили широкое распространение.

Оптимальными с позиций стандартизации следует считать ряды, обеспечивающие наибольший экономический эффект от их использования и *опережающую стандартизацию*, т.е. сокращение объема работ, связанных с пересмотром стандартов и их модернизацией (опережающая стандартизация позволяет увеличить сроки действия стандартов).

Организационная структура проектирования и изготовления РЭС.

Структура и виды технологических процессов.

Технологические процессы (ТП) в зависимости от подробности их разработки, типизации, наличия оборудования и объема выпуска изделий классифицируют на следующие виды:

- проектный (начальная стадия, много вариантов);
- рабочий (конкретный, для работы);
- единичный (ТП только на данное изделие, как правило, массовое производство);
- типовой (на конструктивно подобные изделия, например, ТП на изготовление печатных плат);
- групповой (на технологически подобные изделия для мелкосерийного, многономенклатурного производства);
- временный (оперативный), для имеющегося на предприятии оборудования при изготовлении пробных изделий;
- стандартный (обязательный к применению для отрасли, государства, например, стандартные методики испытания электронно-вычислительной аппаратуры);
- перспективный (для вновь разрабатываемых производств или модернизации старых предприятий);
- маршрутный;
- операционный;
- маршрутно-операционный.

Последние три определяют степень подробности разработки ТП.

Маршрутный технологический процесс определяет порядок (маршрут) следования операций, их вид и наименование, оборудование и оснастку для выполнения операций, трудоемкость выполнения операций и квалификацию работников. Для мелкосерийного производства достаточна разработка маршрутной технологии. При этом все параметры разработки заносятся в маршрутные карты.

Для средне- и крупносерийного, а также массового производств после маршрутной технологии следует разработка операционной технологии. При этом каждая операция разрабатывается подробно. Окончательно выбирается оборудование и оснастка, выбираются или рассчитываются технологические режимы. Операция дробится на технологические переходы – используется принцип дифференциации и концентрации технологических переходов при выполнении операции. Вычерчивается эскиз операции с установочными базами и настроенными размерами. Рассчитывается операционное время ($t_{оп}$) и окончательно устанавливается норма штучного времени ($T_{шт}$). Данные разработки заносятся в операционные карты.

Маршрутно-операционная технология применяется, когда на отдельные наиболее сложные операции маршрутной технологии разрабатывается операционная технология.

Исходными данными для разработки технологических процессов являются:

- конструкторская документация на изделие (сборочные чертежи, рабочие чертежи, электрические схемы, монтажные схемы);
- технические требования на изделие, где указываются дополнительные требования к изделию. Например, необходимость защиты, виды испытаний;
- спецификация на входящие в изделие компоненты;
- объем выпуска продукции (N);
- сроки выпуска (еженедельно, ежемесячно, ежеквартально);
- наличие технологического оборудования, оснастки;
- справочная, нормативная литература, программы.

Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП).

Структура и состав ЕСТПП.

Стадии проектирования технологических процессов (ТП).

Правила разработки техпроцессов определены в рекомендациях Р50-54-93-88. В соответствии с этими правилами разработка ТП состоит из последовательности этапов, набор и характер которых зависит от типа запускаемого в производство изделия, вида ТП, типа производства. В табл. 2.5 в качестве примера приведены этапы разработки ТП монтажа и сборки электронных узлов.

Таблица 2.5.

Этапы разработки ТП монтажа и сборки электронных узлов

Этап	Основные задачи этапа
Анализ исходных данных	Изучение конструкторской документации. Анализ и расчет технологичности конструкции. Анализ объема выпуска изделия и определение типа производства
Выбор типового (базового) ТП	Формирование технологического кода изделия по классификатору. Определение места изделия в классификационной группе. Принятие решения об использовании действующего ТП
Разработка схемы сборки	Анализ состава деталей, комплектующих и сборочных единиц изделия. Выбор базовой детали или сборочной единицы. Анализ способов сборки и монтажа. Разработка схемы сборки с базовой деталью
Составление маршрутного ТП	Определение последовательности технологических операций. Определение штучного времени $T_{шт}$ по заданному коэффициенту закрепления операций $K_{з.о}$ и объему выпуска N изделий. Выбор оборудования и средств технологического оснащения
Разработка технологических операций	Разработка структуры операции и последовательности переходов. Разработка схем базирования и установки деталей при сборке и монтаже. Выбор средств технологического оснащения (окончательный). Расчет точности операции (собираемости). Расчет режимов, составляющих $T_{шт}$ и загрузки оборудования

Расчет технико-экономической эффективности	Определение разряда работ по классификатору разрядов и профессий. Выбор вариантов операций по технологической себестоимости
Анализ ТП с точки зрения техники безопасности	Выбор и анализ требований по шуму, вибрациям, радиации, воздействию вредных веществ. Выбор методов и средств обеспечения сохранности и устойчивости экологической среды
Оформление технологической документации	Оформление эскизов технологических операций и карт. Оформление карт маршрутного и операционного техпроцессов
Разработка ТЗ на специальную оснастку	Схема базирования заготовки (заготовок). Определение погрешностей базирования и точности приспособлений. Определение количества заготовок и схемы их закрепления. Составление схем привязки приспособления к оборудованию

Изучение документации позволяет оценить конструктивную компоновку и особенности сборочного узла; количественный состав навесных элементов и деталей пространственной компоновки; характер размещения и варианты установки ЭРЭ и интегральных микросхем (ИМС) на плате; виды контактных соединений и способы электрического монтажа навесных элементов; технические требования обеспечения надежности функционирования узла и защиты его от внешних воздействий.

Тема3. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСБОРОК

(8 ч. ЛК, 4 ч. СРС)

Классификация ИС и МСБ по функциональному назначению и конструктивно-технологическим признакам.

Тактико-технические, конструктивно-технологические, эксплуатационные и экономические характеристики ЭА определяют примененные в ней микросхемы (МС), выполняющие функции преобразования, хранения, обработки, передачи и приема информации.

#Микросхемой (интегральной микросхемой – ИМС) называют функционально законченный электронный узел (модуль), элементы и соединения в котором конструктивно неразделимы и изготовлены одновременно в едином ТП в общем кристалле-основании.

По конструктивно-технологическому исполнению МС делятся на полупроводниковые и гибридно-пленочные. *Полупроводниковые МС* имеют в своей основе монокристалл полупроводникового материала (обычно кремния), в поверхностном слое которого методами литографии и избирательного легирования создаются транзисторы, диоды, резисторы и (иногда) конденсаторы, а соединения между ними формируются по поверхности кристалла *тонкопленочной технологией*. Полупроводниковые МС бывают *однокристалльные (монолитные)* и *многокристалльные (микросборки)*. Однокристалльная МС может иметь индивидуальный герметизированный корпус с внешними выводами для монтажа на коммутационной (печатной) плате, или быть бескорпусной и входить в состав микросборки.

Многокристалльная микросборка представляет собой совокупность бескорпусных МС, смонтированных на общей коммутационной плате. В качестве компонентов в микросборке могут присутствовать бескорпусные согласующие резисторы и развязывающие конденсаторы. Вследствие высокой насыщенности связей коммутационная плата выполняется многоуровневой и, таким образом, является миниатюрным аналогом многослойной ПП. При изготовлении коммутационной платы используют как тонкопленочную, так и *толстопленочную* технологии

Гибридно-пленочные МС состоят из пленочных пассивных элементов (резисторов и конденсаторов), коммутационных проводников, нанесенных непосредственно на подложку из изоляционного материала, и бескорпусных полупроводниковых кристаллов (транзисторов, диодов, диодных матриц, несложных ИМС), монтируемых на той же подложке. Пассивные элементы и проводники выполняются по тонкопленочной или толстопленочной технологии. В качестве активных элементов в полупроводниковых микросхемах используются *униполярные (полевые)* транзисторы со структурой «металл – диэлектрик (оксид) – полупроводник» (МДП- или МОП-*транзисторы*) и *биполярные* транзисторы.

Технологические методы изготовления МСБ.

Технологические основы получения толстых и тонких пленок. Методы формирования конфигурации тонкопленочных элементов МСБ и их сравнительная характеристика.

Основы толстопленочной технологии

Толстые пленки толщиной в несколько десятков микрон применяют для изготовления пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, проводников и

контактов) в гибридных толстопленочных МС, а также проводников и изолирующих слоев в некоторых типах многоуровневых коммутационных микроплат микросборок.

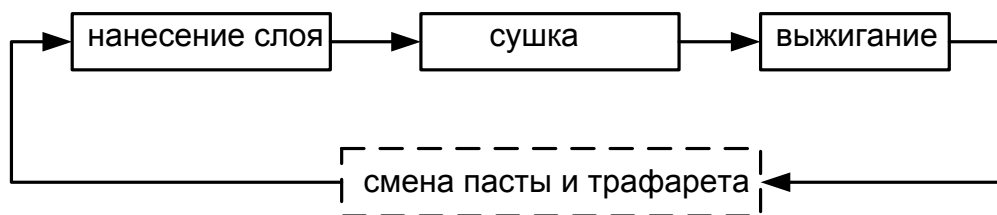


Рис. 3.1. Структурная схема цикла толстопленочной технологии

В основе толстопленочной технологии лежит использование дешевых и высокопроизводительных процессов, требующих небольших единовременных затрат на подготовку производства, благодаря чему она оказывается экономически целесообразной и в условиях мелкосерийного производства. Высокая надежность толстопленочных элементов обусловлена прочным (свыше 5 МПа) сцеплением с керамической подложкой, которое достигается процессом вжигания пасты в поверхностный слой керамики.

В целом толстопленочная технология состоит из ряда последовательных идентичных циклов, структурная схема которых приведена на рис. 3.1. При формировании каждого слоя (резистивного, проводящего, диэлектрического и т.п.) используют соответствующие пасты, которые через сетчатый трафарет наносят на подложку, подвергают сушке и вжиганию. По завершении формирования всех слоев все резисторы и конденсаторы проходят подгонку (обычно лазерную) до заданной точности.

Толстопленочные пасты.

В готовом (вожженном) состоянии толстопленочный элемент состоит из мелких функциональных частиц, находящихся в массовом контакте друг с другом (рис. 3.2) и «склеенных» стеклом с невысокой (400...500 °С) температурой плавления.

Для проводящих элементов используют порошки серебра, палладия и других металлов с высокой электропроводностью.

Для резистивных – смесь порошков проводящих частиц и частиц окислов металлов в различных пропорциях, что позволяет варьировать удельное поверхностное сопротивление в широких пределах.

Диэлектрические слои конденсаторов содержат порошки сегнетоэлектриков, которые, обладая большим значением относительной диэлектрической проницаемости ε , обеспечивают большие значения удельной электрической емкости C_0 , $\Phi/\text{см}^2$.

Изолирующие слои, наоборот, создаются на основе порошков стекол с малыми ε и C_0 . Функциональные частицы в процессе вжигания должны сохранять твердое состояние и массовый контакт, т.е. иметь температуру плавления более 900 °С.

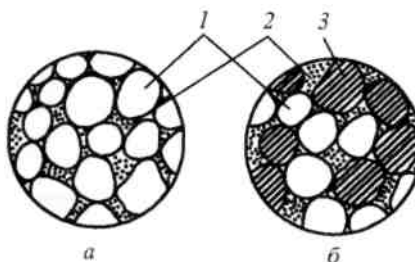


Рис 3.2. Структура толстопленочных элементов: 1 – частицы металла; 2 – конструкционная связка; 3 – частицы окисла металла

Трафаретная печать. *Трафарет* – проволоочная сетка из нержавеющей стали или капроновой нити с нанесенным на нее фотоспособом защитным рисунком. Сетка вмонтирована в металлическую рамку. Керамическая подложка устанавливается под

трафаретом с зазором, обеспечивающим деформацию сетки в пределах ее упругости (рис. 3.3). Для этого размеры сетки должны быть существенно больше размеров рисунка. После нанесения дозированного количества пасты движением ракеля она продавливается через открытые участки трафарета и переносится на подложку. Таким образом, контакт трафарета с подложкой происходит по линии, движущейся вместе с ракелем.

В процессе сушки полученного отпечатка удаляются летучие компоненты технологической связки.

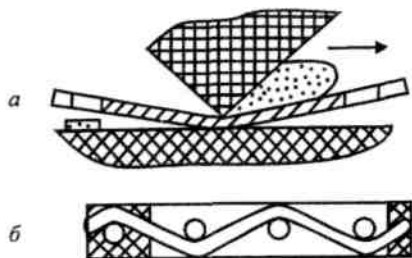


Рис. 3.3. Схема переноса пасты с трафарета на подложку (а) и структура сетчатого трафарета (б)

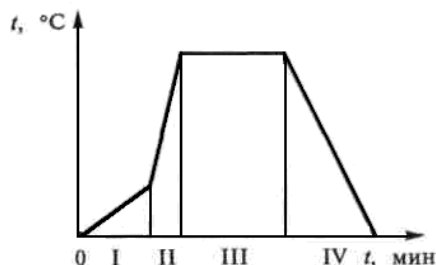


Рис. 3.4. Температурный цикл вжигания пасты

Вжигание. На рис. 3.4 приведен типичный температурный цикл *вжигания* пасты. На первой стадии скорость повышения температуры относительно невысока, происходит разложение органической связки и ее удаление интенсивной вытяжной вентиляцией. На второй стадии скорость роста температуры повышают, происходит плавление низкотемпературного стекла и образование суспензии твердых функциональных частиц в расплавленном стекле. Собственно вжигание происходит на третьей стадии при постоянной температуре. При этом имеет место как химическое (взаимодействие окислов стекла и керамики), так и физическое (заполнение стеклом открытых поверхностных пор керамики) сцепление покрытия с подложкой. После выдержки (примерно 10 мин) изделия медленно охлаждают (четвертая стадия) во избежание внутренних напряжений. Общая продолжительность цикла порядка одного часа.

В зависимости от типа производства вжигание осуществляют в камерных печах периодического действия (мелкосерийное производство), либо в туннельных печах непрерывного действия (крупносерийное и массовое производство).

Коммутационные платы микросборок

Коммутационная плата микросборки представляет собой миниатюрный аналог многослойной ПП. На поверхности коммутационных плат монтируются компоненты микросборки – бескорпусные интегральные МС (кристаллы), микроплаты с группой интегральных тонкопленочных резисторов (согласующих входы и выходы ИМС), одиночные объемные миниатюрные конденсаторы (в качестве развязывающих элементов). Высокая плотность монтажа требует и высокого разрешения коммутационного рисунка. В отличие от ПП его получают путем осаждения тонких пленок в вакууме с последующей фотолитографией, или по толстопленочной технологии. Коммутационные проводники должны находиться на нижних уровнях платы, а на поверхность выходят только монтажные площадки для сварки или пайки выводов (перемычек) компонентов.

В зависимости от материала изолирующих слоев и способа их формирования коммутационные платы можно разделить на четыре типа: тонкопленочные с использованием осаждения в вакууме; тонкопленочные с использованием окисления алюминия в электролите (анодирование); толстопленочные; на основе многослойной керамики.

Тонкопленочные платы

Формирование слоев (уровней) тонкопленочной платы выполняется на общей подложке из электроизолирующего материала (ситалл, поликор и др.) путем повторяющихся циклов осаждение тонкой пленки в вакууме – фотолитография. Из рис. 3.5 следует, что осажденный сплошной слой электропроводящего металла (чаще всего алюминия) после фотолитографии превращается в систему проводников, перпендикулярных плоскости чертежа. В этой системе предусматривают расширенные площадки для контактных переходов на следующий уровень. В осажденном затем в вакууме изолирующем слое с помощью фотолитографии получают окна для контактных переходов, и вновь осаждается электропроводящий слой, в котором фотолитографией формируют систему проводников, ортогональных к нижележащим. При этом через окна в изолирующем слое создается контактный переход. Эти циклы повторяются вплоть до последнего, верхнего уровня металлизации. В последнем изолирующем слое вскрываются лишь окна над монтажными площадками: для электромонтажа компонентов и периферийными площадками для монтажа микросборки в целом в модуле следующего уровня (например, на ПП ячейки).

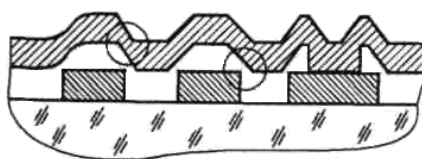


Рис 3.5. Структура тонкопленочной коммутационной платы (нижние уровни)

Нетрудно заметить, что с первого же цикла обработки в многоуровневой системе возникает и развивается рельеф, создающий ступеньки в изолирующих и проводящих слоях (на рис. 3.5 отмечены кружками). Эти участки являются потенциальной причиной отказа: в первом случае – пробоя изоляции, во втором – разрушения проводника.

Тонкопленочные платы на основе анодированного алюминия

Сохранение плоскостности покрытий на каждом этапе обработки обеспечивает применение в качестве изолирующих слоев оксида алюминия (Al_2O_3), получаемого путем окисления алюминиевого покрытия в электролите. В зависимости от режимов электролитического окисления (анодирования) можно с малой скоростью роста получить пленку оксида алюминия с высокими электрическими свойствами или ускоренно получить пленку с пониженными электрическими свойствами. В первом случае плотную пленку получают на мягких режимах (малые плотности тока) и используют для изоляции смежных уровней проводников. Во втором случае пористую пленку формируют на форсированных режимах (высокие плотности тока) и используют для изоляции соседних проводников одного уровня, причем снижение пробивной напряженности пленки компенсируется увеличением толщины (точнее – ширины) пленки ($U_{np}=E_{np} d$).

На рис. 3.6 показана последовательность формирования первого цикла обработки. После осаждения на подложку 1 сплошного слоя алюминия 2 на поверхности формируют фотомаску 3, рисунок которой соответствует рисунку промежутков между будущими проводниками. Выполнив на мягких режимах избирательное анодирование алюминия, получают тонкий (около 0,2 мкм) и плотный слой 4 Al_2O_3 (рис. 3.6, а). Далее (рис. 3.6, б) фотомаску удаляют и выполняют анодирование на форсированных режимах на всю толщину пленки 5 (маской при этом служит тонкий плотный слой оксида). Путем фотолитографии (рис. 3.6, в) удаляют участки тонкого оксида, не защищенные фотомаской 6, для создания контактных переходов и напыляют (рис. 3.6, г) следующий сплошной слой алюминия 7 (второй уровень металлизации). Затем описанный цикл повторяется.

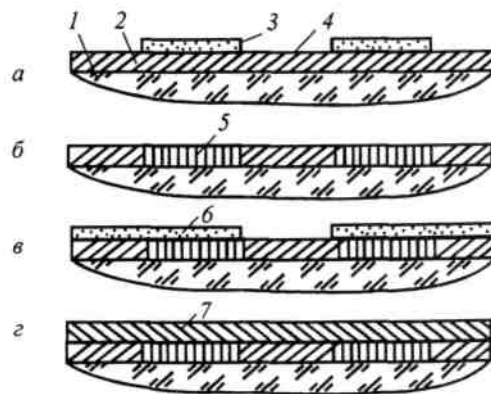


Рис. 3.6. Последовательность формирования коммутационной платы на основе анодированного алюминия (нижние уровни)

Толсто пленочные платы

Для пояснения сущности процесса воспользуемся рис. 3.5. Вместе циклов «осаждение тонкой пленки в вакууме – фотолитография» в данном случае используются циклы «нанесение пасты через трафарет – сушка – вжигание», а подложку заменяют на керамическую – термостойкий прочный материал.

Для формирования многоуровневой системы используют проводящую и диэлектрическую пасты. Поскольку толщина межслойной изоляции в 2–3 раза превышает толщину проводящего слоя, для получения качественных контактных переходов проводят предварительно одно- или двукратное нанесение проводящей пасты в окна изолирующего слоя по циклу «нанесение пасты через трафарет – сушка» (без вжигания). На заключительном этапе изготовления платы аналогичный прием используют для формирования монтажных площадок, которые впоследствии облуживают лудящей пастой.

Следует подчеркнуть, что в многоуровневых системах вжигание паст в керамику происходит лишь на границе нижнего проводящего и нижнего изолирующего слоев с подложкой. Прочность сцепления последующих слоев друг с другом обеспечивается за счет расплавления в них низкотемпературного стекла и затем отверждения.

Платы на основе многослойной керамики. В отличие от предыдущих типов плат, все слои которых формируют на общей подложке, в данном случае каждый проводящий слой наносят на собственную индивидуальную подложку из необожженной («сырой») керамики. Впоследствии отдельные листы керамики с проводящим рисунком собирают в пакет.

Исходными заготовками платы являются листы пластичной керамики толщиной 0,1 мм, полученные методом экструзии (выдавливанием пластичной керамической массы через щелевидный фильер). В отдельных листах керамики пробивкой или сверлением получают базовые отверстия, а затем (базируя листы по этим отверстиям) – отверстия под контактные переходы диаметром не менее 0,1мм (рис. 3.7, а). Используя те же базовые отверстия на каждой заготовке, через сетчатый трафарет заполняют отверстия под переходы проводящей пастой, а затем с помощью другого трафарета наносят проводящий рисунок и сушат.

Следует подчеркнуть, что вследствие высоких температур (1400...1700 °С) последующего обжига керамики приходится отказываться от высокоэлектропроводных серебряно-палладиевых паст и использовать пасты на основе частиц тугоплавких металлов (вольфрама или молибдена).

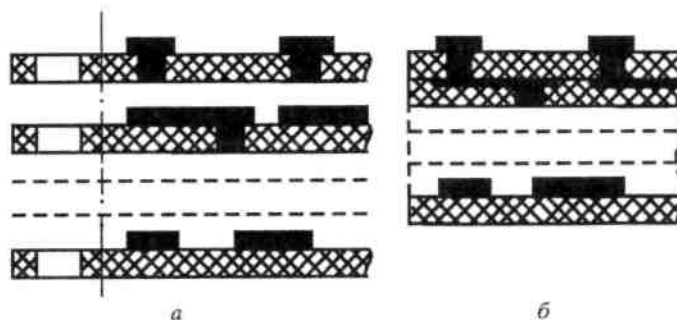


Рис. 3.7. Коммутационная плата на основе многослойной керамики: а – отдельные керамические подложки с проводящим рисунком; б – плата в сборе

Затем, используя те же базовые отверстия, отдельные листы собирают в пакет (рис. 3.7, б), подпрессовывают и штамповкой отделяют периферийную часть с базовыми отверстиями. Пакет подвергают высокотемпературной обработке. При этом протекают два параллельных процесса: вжигание проводящего рисунка в керамику и спекание (взаимодиффузия) частиц окислов, из которых состоит керамическая масса. На первой стадии обжига также происходит разложение и удаление пластификатора (технологической связки).

Выходящие на поверхность платы монтажные площадки на основе вольфрама или молибдена не допускают сварки и не смачиваются припоем. Для возможности облуживания таких площадок и последующей их пайки на них предварительно создают слой никеля путем химического осаждения из раствора.

Основы конструирования гибридных тонкопленочных микросборок: анализ ТЗ, разделение на элементы и компоненты схемы, выбор пленочных материалов, расчет конструкции тонкопленочных резисторов, конденсаторов, индуктивностей, проводников и контактных площадок.

Стабилизация и подгонка параметров элементов гибридных МСБ.

Принципы разработки топологии и защиты от внешних воздействий гибридных МСБ.

Герметизация микросхем и микросборок

Защиту МС и микросборок от механических повреждений и воздействия окружающей среды обеспечивают использованием различных методов герметизации. Различают *корпусную* (с использованием полых или монолитных конструкций) и *бескорпусную* герметизацию.

Бескорпусная герметизация

Большинство полупроводниковых приборов и ИС, используемых в бытовой и электронно-вычислительной аппаратуре, выполняют в пластмассовых корпусах. По сравнению с другими методами процесс герметизации пластмассами характеризуется высокой производительностью, относительно низкой стоимостью и простотой.

Для герметизации МС используют различные полимеры с добавками, влияющими на пластичность, текучесть, цвет, скорость отверждения пластмасс. Текучесть характеризуется временем, в течение которого герметизирующий состав находится в вязком состоянии при заданной температуре окружающей среды. Скоростью отверждения называют скорость перехода пластмасс в состояние полной полимеризации.

В зависимости от поведения при нагревании пластмассы делят на термопласты и реактопласты. Термопласты сохраняют свои свойства при многократном нагреве. Реактопласты под воздействием повышенной температуры переходят в необратимое состояние. В качестве герметизирующих материалов используют компаунды (механические смеси из электроизоляционных материалов, не содержащие растворителей) и пресс-порошки на основе эпоксидных, кремнийорганических, полиэфирных смол.

Эпоксидные смолы характеризуются плотностью $\gamma = 2,5...3 \text{ г/см}^3$, термостойкостью $T = 150...230 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициентом диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 4...5$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0,01$.

Кремнийорганические смолы характеризуются плотностью $\gamma = 1...5 \text{ г/см}^3$, термостойкостью $T = -60...+300 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициентом диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 2,8...3,6$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0,003-0,005$.

Полиэфирные смолы характеризуются плотностью $\gamma = 0,7...0,8 \text{ г/см}^3$, термостойкостью $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициентом диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 2,8...5,2$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0,005$.

Герметизация методом обволакивания. При герметизации обволакиванием вокруг МС создается тонкая пленка полимерного материала. Для обеспечения механической прочности и герметичности полупроводниковых приборов и МС наносят несколько слоев герметизирующего состава с предварительным подсушиванием каждого слоя.

Метод герметизации обволакиванием характеризуется устойчивостью защищаемых приборов к воздействию влажной атмосферы, простотой процесса, малым расходом герметизирующего материала, возможностью применения групповых методов обработки.

Герметизация микросхем методом свободной заливки. Сущность метода герметизации МС методом свободной заливки состоит в заполнении жидким герметизирующим компаундом специальных форм или заранее изготовленных из пластмассы или металла корпусов, в которых размещают МС с выводами. Свободная заливка компаунда без давления уменьшает вероятность обрыва проволочных перемычек МС.

Применяют два метода свободной заливки: во вспомогательные разъемные формы (полимерный или металлополимерный) и предварительно изготовленные корпуса.

Герметизацию микросхем *заливкой во вспомогательные разъемные формы* относят к бескорпусной, т.к. такая герметизация не требует специально изготовленных деталей корпусов. Однако она обеспечивает производство МС со строго фиксированными габаритными размерами, размерами выводов, шага между выводами и т.д.

При герметизации *заливкой в предварительно изготовленные корпуса* полупроводниковые структуры сначала закрепляют на перфорированную ленту, состоящую из объединенных между собой фрагментов плоских выводов. Контакт между плоскими выводами перфорированной ленты и контактными площадками полупроводниковой структуры создают проволочными перемычками.

Герметизация МС заливкой в предварительно изготовленные корпуса отличается простотой, так как в этом случае не требуется изготовление дорогостоящих заливочных форм. Корпуса представляют собой пластмассовую оболочку, изготовленную горячим прессованием, или металлическую капсулу, изготовленную штамповкой. Они имеют разнообразную геометрическую форму и типоразмеры.

Заливку в корпуса-оболочки осуществляют в основном теми же герметизирующими составами, что и заливку в формы. После полимеризации герметизирующего компаунда эти корпуса остаются частью МС (рис. 3.8).

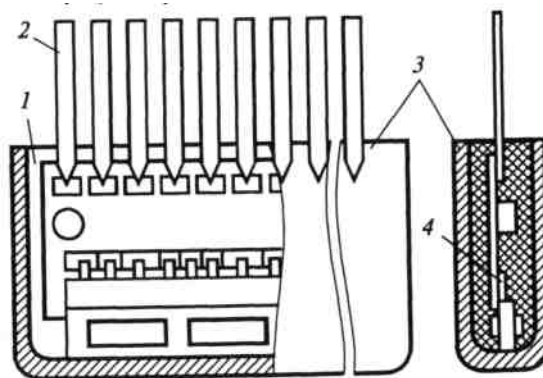


Рис. 3.8. Герметизация микросхем методом заливки в корпуса:

1 – плата с навесными компонентами; 2 – выводы; 3 – корпус; 4 – заливочный компаунд

К недостаткам метода свободной заливки в формы относятся сравнительно невысокая производительность и необходимость проводить приготовление заливочных смесей в небольших количествах, так как со временем очень быстро изменяется их вязкость.

Герметизация прессованием. Герметизация МС методом прессования пластмасс основана на особенности некоторых полимерных материалов плавиться и течь под действием температуры и давления, заполняя полость металлической формы с изделиями. В этом случае используют полимеры в виде пресс-порошков и таблеток, которые не изменяют своих свойств в течение длительного времени, что исключает операцию приготовления герметизирующих компаундов. В качестве герметизирующих материалов применяют термореактивные полиры, прессующиеся при низких давлениях, что позволяет герметизировать МС с гибким проволочным монтажом.

В микроэлектронике используют в основном два способа герметизации МС прессованием: компрессионное и литьевое (трансферное).

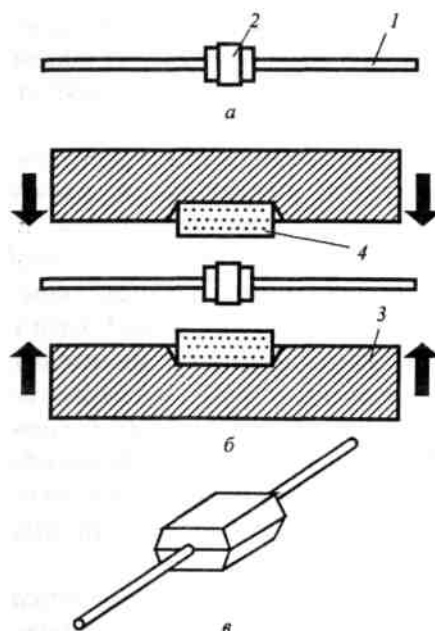


Рис. 3.9. Герметизация микросхем методом компрессионного прессования:

а – арматура с полупроводниковой структурой; б – загрузка арматуры с полупроводниковой структурой и пресс-порошка; в – загерметизированный прибор;
1 – выводы; 2 – полупроводниковая структура; 3 – пресс-форма; 4 – пресс-порошок

При *компрессионном прессовании* собранную с арматурой полупроводниковую структуру и порошкообразный или таблетированный материал загружают непосредственно в пресс-форму (рис. 3.9). Под действием тепла и давления герметизирующий материал

переходит в пластичное состояние и заполняет формующую полость. После окончания выдержки опрессованные изделия извлекают из пресс-формы (рис. 3.9, в).

При *литьевом (трансферном) прессовании* загрузочная камера пресс-формы отделена от формующей полости. Кассету или перфорированную ленту с несколькими смонтированными полупроводниковыми структурами помещают в формующие полости пресс-формы. Пресс-форму нагревают до температуры плавления пластмассы нагревателями, вмонтированными непосредственно в пресс-форму. Расплавившаяся пластмасса под давлением опускающегося пуансона (трансфера) заполняет формующие полости пресс-формы. После частичной полимеризации кассету или перфорированную ленту с полупроводниковыми структурами извлекают из пресс-формы и окончательно полимеризуют. Загерметизированные полупроводниковые структуры извлекают из кассеты и отделяют друг от друга.

Шовноклеевая герметизация. При шовноклеевой герметизации используют пластмассовые корпуса с армированными выводами (рис. 3.10). Клеящий состав наносят по периметру основания корпуса после установки на него кристалла МС. На основание корпуса устанавливают пластмассовую крышку. Сборку фиксируют в приспособлении и сушат на воздухе или в термошкафу. Достоинствами шовноклеевой герметизации являются высокая технологичность процесса и низкая стоимость изделий.

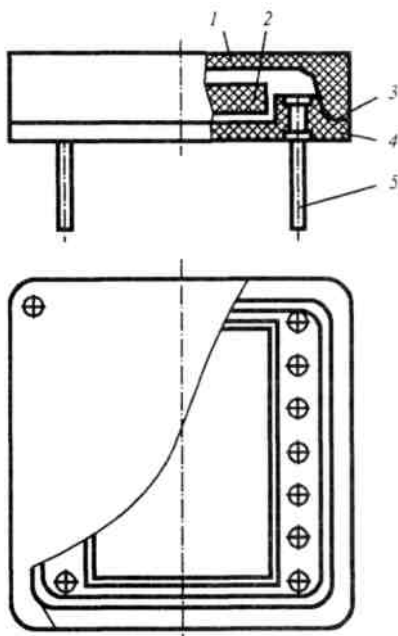


Рис. 3.10. Шовноклеевая герметизация микросхем: 1 – крышка; 2 – подложка с микросхемой; 3 – место склеивания; 4 – основание корпуса; 5 – армированный вывод

Корпусная герметизация микросхем

Полимерные материалы не обеспечивают полной защиты МС от влаги. Это связано с тем, что влагопроницаемость пластмасс во много раз выше, чем у металлов; температурные коэффициенты линейного расширения пластмасс и металлических выводов МС отличаются примерно на порядок, поэтому трудно создать герметичное соединение между пластмассой и металлом. Надежным методом герметизации полупроводниковых приборов, МС и гибридно-пленочных микросборок является вакуум-плотная корпусная герметизация.

Корпуса МС являются композитными конструкциями, которые характеризуются тем, что механические напряжения в них возникают даже при равномерном изменении температуры и концентрируются в местах сопряжения материалов с различными термомеханическими свойствами.

Корпуса МС и микросборок должны защищать их от воздействия окружающей среды и механических повреждений; обеспечивать удобство монтажа кристаллов и подложек и герметизацию корпуса без изменения параметров кристалла и навесных компонентов; выдерживать механические воздействия и термоциклирование; отводить тепло в процессе сборки и эксплуатации изделий; обеспечивать надежность сборки и эксплуатации прибора; защищать кристалл и навесные компоненты от загрязнений пылью, газообразными химическими загрязнениями, солями и парами воды; быть дешевыми и технологичными в изготовлении; при монтаже на ПП обеспечивать удобство и надежность монтажа и коррозионную стойкость; обеспечивать контроль МС до и после монтажа; обладать коррозионной стойкостью, высокой надежностью, технологичностью и низкой себестоимостью.

Корпуса микросхем бывают металlostеклянными, металлокерамическими, металлопластмассовыми, стеклянными, керамическими и пластмассовыми.

В первых трех разновидностях корпусов крышка выполняется металлической, а основание – стеклянным, керамическим или пластмассовым. Металлическая крышка обеспечивает эффективную влагозащиту при хорошем отводе теплоты от кристалла, снижает уровень помех.

В пластмассовых и керамических корпусах крышку и основание выполняют из однородного материала. Основание корпуса соединяют с крышкой пайкой, сваркой или склеиванием. Некоторые корпуса получают путем заливки формы корпуса пластмассой. На корпус МС наносится маркировка в соответствии с ее условным обозначением и выполняется нумерация выводов относительно *ключа* или *метки*. По форме проекции тела корпуса на установочную плоскость и расположению выводов корпуса делят на типы и подтипы (табл. 3.1).

Для правильной установки МС на плату корпуса имеют ориентир (ключ), расположенный в зоне первого вывода (выводы нумеруются слева направо или по часовой стрелке со стороны расположения выводов). Ключ делается визуальным в виде металлизированной метки, выемки или паза в корпусе, выступа на выводе и пр. В поперечном сечении выводы корпусов имеют круглую, квадратную или прямоугольную форму. Шаг между выводами составляет 0.625; 1.0; 1.25; 1.7 и 2.5 мм.

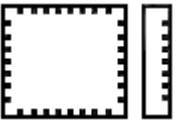
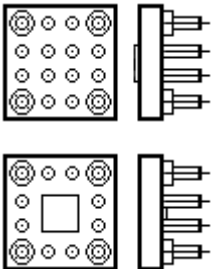
Типы корпусов микросхем подразделяются на типоразмеры, каждому из которых присваивается шифр, обозначающий тип корпуса и двузначное число порядкового номера типоразмера. Затем через точку указывается количество выводов корпуса. Например, корпус с 48 выводами и условным обозначением 4113.48–1 соответствует корпусу четвертого типа, 41-му подтипу с порядковым номером 13. Последняя цифра условного обозначения – порядковый регистрационный номер. Для МС в экспортном исполнении вместо регистрационного номера вводится латинская буква *Е*.

Каждый тип корпуса имеет достоинства и недостатки. Корпус с *планарными выводами* для установки и монтажа требует на печатной плате почти вдвое больше площади, чем тех же размеров корпус, но с ортогональным расположением выводов. Однако установка таких корпусов возможна с двух сторон платы. Жесткие *штыревые выводы* с ортогональной ориентацией относительно плоскости основания позволяют устанавливать микросхемы на плату без дополнительной поддержки даже при жестких вибрационных и ударных нагрузках. При совместной установке микросхем и ЭРЭ для упрощения монтажных работ следует рекомендовать корпуса со штыревыми выводами. Пластмассовые корпуса дешевы, обеспечивают хорошую защиту от механических воздействий, но хуже других типов корпусов защищают от климатических воздействий, перегрева.

Таблица 3.1.

Типы и подтипы корпусов микросхем.

Тип	Под-тип	Расположение выводов относительно установочной плоскости	Внешний вид корпуса	Форма проекции тела корпуса на установочную плоскость
1	11	Перпендикулярное в один ряд		Прямоугольная
	12	Перпендикулярное в два ряда		
	13	Перпендикулярное в три ряда		
	14	Перпендикулярное по контуру прямоугольника		
	15	Перпендикулярное, в один ряд или отформованные в два ряда		
2	21	Перпендикулярное в два ряда		Прямоугольная
	22	Перпендикулярное в четыре ряда в шахматном порядке		
3	31	Перпендикулярное по окружности		Круглая
	32	Перпендикулярное по окружности		Овальная
4	41	Параллельное по двум противоположным сторонам		Прямоугольная
	42	Параллельное по четырем сторонам		
	43	Параллельное, отформованное по двум сторонам		
	44	Параллельное, отформованное по четырем сторонам		
	45	Параллельное, отформованное под корпус по четырем сторонам		

5	51	Перпендикулярное для боковых площадок выводов по четырем сторонам		Прямоугольная
	52	Перпендикулярное для боковых площадок выводов по двум сторонам		Квадратная
6	61	Перпендикулярное в несколько рядов		Квадратная
	62	Перпендикулярное в несколько рядов со стороны крышки корпуса		

Тема 4. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК И БЛОКОВ РЭС

(14 ч. ЛК, 7 ч. СРС)

Общая методология конструирования РЭС. Факторы, учитываемые при разработке конструкции РЭС.

Конструирование бортовых РЭС опирается на два основных принципа: модульный принцип конструирования и принцип комплексной микроминиатюризации.

Модульный принцип конструирования основывается на разбиении конструкции РЭС на конструктивно и функционально законченные модули различных, конструктивных уровней, причем основные габаритные, присоединительные и установочные размеры этих модулей унифицированы.

Принцип комплексной микроминиатюризации предполагает системный подход к проектированию конструкций, который заключается в применении всех возможных средств миниатюризации конструкции РЭС с целью получения высоких (или даже предельных для данного уровня) показателей.

Правила микроэлектронного конструирования РЭС включают в себя все общие правила и принципы, характерные для РЭС в целом. Перечислим основные:

- 1 – невозможно создать новый экономически приемлемый и работоспособный вариант микроэлектронной конструкции, не пересмотрев принципиальную электрическую схему прототипа;
- 2 – использование принципиальной электрической схемы обычных РЭС в микроэлектронном варианте с новой элементной базой полностью исключается: в лучшем случае в основу его разработки может быть положена функциональная электрическая схема, в остальных – только требования ТЗ;
- 3 – при конструировании микроэлектронных средств должен быть использован новый подход к проектированию структуры РЭС;
- 4 – использование ИС возможно большей степени интеграции для повышения надежности и уменьшения массы, габаритов и стоимости РЭС;

5 – применение в конструкциях аналоговых устройств и субблоков навесных компонентов, по форме совместимых с планарными конструкциями ИС, дает уменьшение дезинтеграции по массе и объему;

6 – замена функциональных узлов из дискретных ЭРЭ на аналогии интегральной и функциональной электроники.

Методы конструирования бортовой РЭС можно разделить на методы, основанные на видах выявляемых связей между элементами конструкций РЭС и на методы, основанные на способах выявления структур связей.

К первой группе методов относятся: геометрический, машиностроительный и топологический методы.

Геометрический метод основывается на геометрических и кинематических связях между деталями, представляющими собой систему опорных точек, число и размещение которых от заданных степеней свободы и геометрических свойств твёрдого тела.

Машиностроительный метод основывается на структуре механических связей между элементами конструкции, представляющей собой систему опорных плоскостей.

Топологический метод основывается на структуре физических связей между элементами конструкции.

Ко второй группе методов относятся базовый метод и метод моноконструкций.

Базовый метод основывается на модульном принципе конструирования и является основным при проектировании конструкций самолетной и вертолетной РЭС с применением базовых несущих конструкций.

Метод моноконструкций основывается на принципе комплексной микроминиатюризации и применяется преимущественно при проектировании конструкций ракетной и космической РЭС.

Размещение РЭС на летательных аппаратах. Компоновка и конструирование РЭС. Цель компоновки. Методы выполнения компоновочных работ.

Виды печатных плат и методы их изготовления.

#Печатные платы – это элементы конструкции, которые состоят из плоских проводников в виде участков металлизированного покрытия, размещенных на диэлектрическом основании и обеспечивающих соединение элементов электрической цепи.

В зависимости от назначения и от возможностей производства (от числа нанесенных печатных проводящих слоев) ПП выполняют односторонними, двусторонними или многослойными, на жестком или гибком основании (Рис. 4.1).

Односторонние ПП (ОПП) представляют собой изоляционное основание, на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок. ОПП выполняются на слоистом прессованном или рельефном литом основании без металлизации (рис. 4.2,а) или с металлизацией (рис. 4.2,б) монтажных отверстий.

Платы на слоистом диэлектрике просты по конструкции и экономичны в изготовлении. Их применяют для монтажа бытовой радиоаппаратуры, блоков питания и устройств техники связи.

Низкие затраты, высокие технологичность и нагревостойкость имеют рельефные (трехмерные) литые ПП, на одной стороне которых расположены элементы печатного монтажа, а на другой – объемные элементы (корпуса соединителей, периферийная арматура для крепления деталей и ЭРЭ, теплоотводы и др.). В этих платах за один технологический цикл получается вся конструкция с монтажными отверстиями и

специальными углублениями для расположения ЭРЭ, монтируемых на поверхность. В настоящее время технология рельефных ПП интенсивно развивается.

Недостаток ОПП: трассировка проводников на одной поверхности (в одном слое, в одном уровне) не позволяет разрешить конфликт пересекающихся трасс иначе, как установкой навесных проводных перемычек.

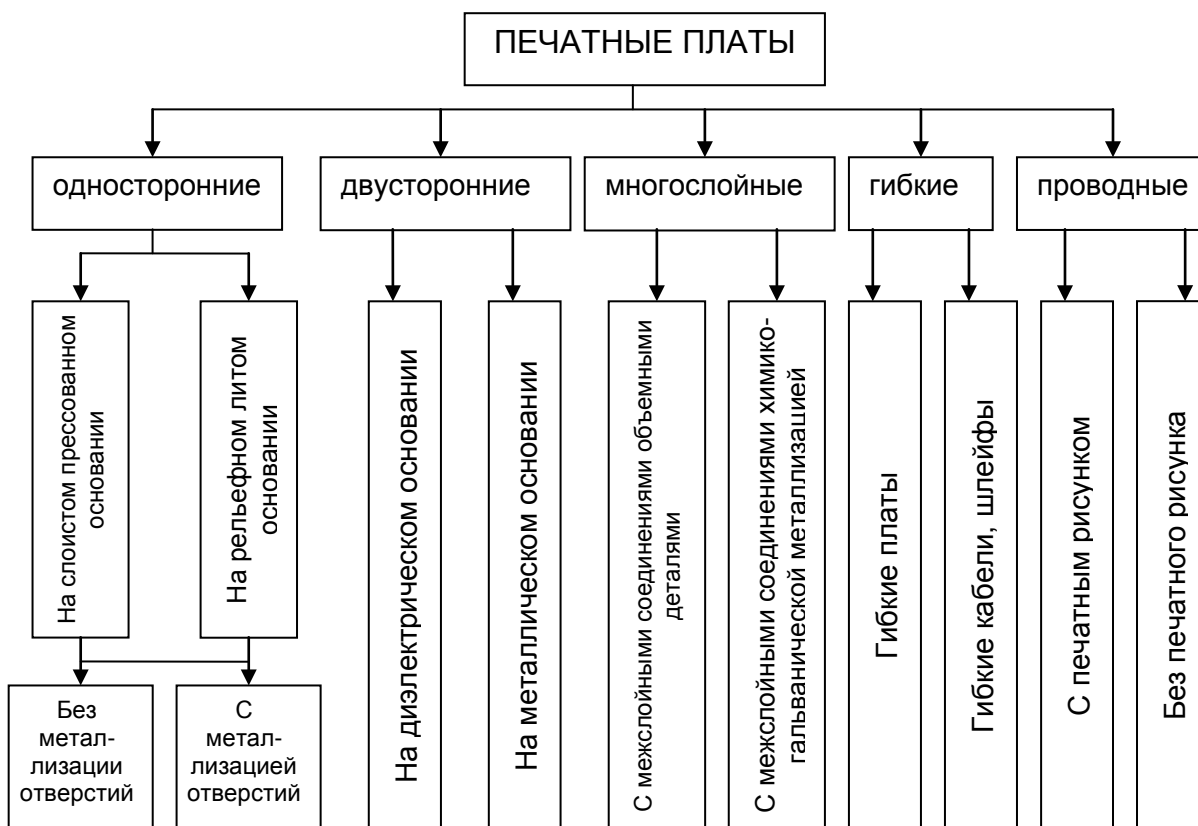


Рис. 4.1. Классификация печатных плат.

Двусторонние печатные платы (ДПП) имеют проводящий рисунок на обеих сторонах диэлектрического (рис. 4.2, в) или металлического (рис. 4.2, г) основания. Электрическая связь слоев печатного монтажа осуществляется с помощью металлизации отверстий. Конфликты пересекающихся соединений здесь решаются возможностью переноса конфликтующей трассы в обход на другую сторону ПП с использованием металлизированных отверстий. ДПП обладают повышенной плотностью монтажа и надежностью соединений. Они используются в измерительной технике, системах управления и автоматического регулирования. Расположение элементов печатного монтажа на металлическом основании позволяет решить проблему теплоотвода в высокоточной и радиопередающей аппаратуре.

Многослойные печатные платы (МПП) состоят из чередующихся слоев изоляционного материала и проводящего рисунка, физически соединенными в одно многослойное основание (путем прессования) (рис. 4.2, д). Электрическая связь между проводящими слоями выполняется специальными объемными деталями, печатными элементами или химико-гальванической металлизацией. По сравнению с ОПП и ДПП они характеризуются повышенной надежностью и плотностью монтажа, устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям, уменьшением размеров и числа контактов. Однако большая трудоемкость изготовления, высокая точность рисунка и совмещения отдельных слоев, необходимость тщательного контроля на всех операциях, низкая ремонтпригодность, сложность технологического оборудования и высокая стоимость позволяют применять МПП для тщательно отработанных конструкций электронно-вычислительной, авиационной и космической аппаратуры.

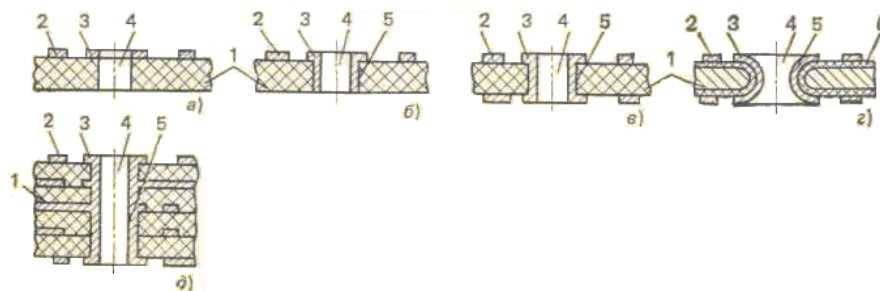


Рис. 4.2. Сечения печатных плат: 1—основание диэлектрическое или металлическое; 2 – печатный проводник; 3 – контактная площадка; 4 – монтажное отверстие; 5 – металлизация; 6 – диэлектрик

Гибкие печатные платы (ГПП) оформлены конструктивно как ОПП или ДПП, но выполняются на эластичном основании толщиной 0,1...0,5 мм. Они применяются в тех случаях, когда плата после изготовления подвергается вибрациям, многократным изгибам или ей после установки ЭРЭ необходимо придать компактную изогнутую форму.

Проводные печатные платы представляют собой диэлектрическое основание, на котором выполняются печатный монтаж или его отдельные элементы (контактные площадки, шины питания и заземления), а необходимые электрические соединения проводят изолированными проводами диаметром 0,1÷0,2 мм. Эти платы нашли применение на этапах макетирования, разработки опытных образцов, в условиях мелкосерийного производства, когда проектирование и изготовление МПП неэкономично.

Методы изготовления ПП

Методы изготовления ПП (Рис. 4.3) разделяют на две группы:

- субтрактивные;
- аддитивные
- и их комбинации:
- полуаддитивный, сочетающий преимущества субтрактивного и аддитивного методов;
- комбинированный.

1. Субтрактивные методы

Субтрактивный метод (subtratio – отнимание) наиболее освоен и распространен для простых и очень сложных конструкций печатных плат.

В качестве исходного материала используются фольгированные (в основном медью) изоляционные материалы. После переноса рисунка печатных проводников в виде стойкой к растворам травления пленки на фольгированную основу, незащищенные ею места химически стравливаются. Защитную пленку наносят методами полиграфии: фотолитографией, трафаретной печати и др. При использовании фотолитографии, защитная пленка формируется из фоторезиста материала, чувствительного через фотокопию печатного рисунка – фотошаблон. При трафаретной печати используют специальную, химически стойкую краску, называемую трафаретной.

2. Аддитивные методы

Эти методы предполагают использование нефольгированных диэлектрических оснований, на которые тем или другим способом, избирательно (там, где нужно) наносят токопроводящий рисунок. Разновидности метода определяются способами металлизации и избирательностью металлизации.

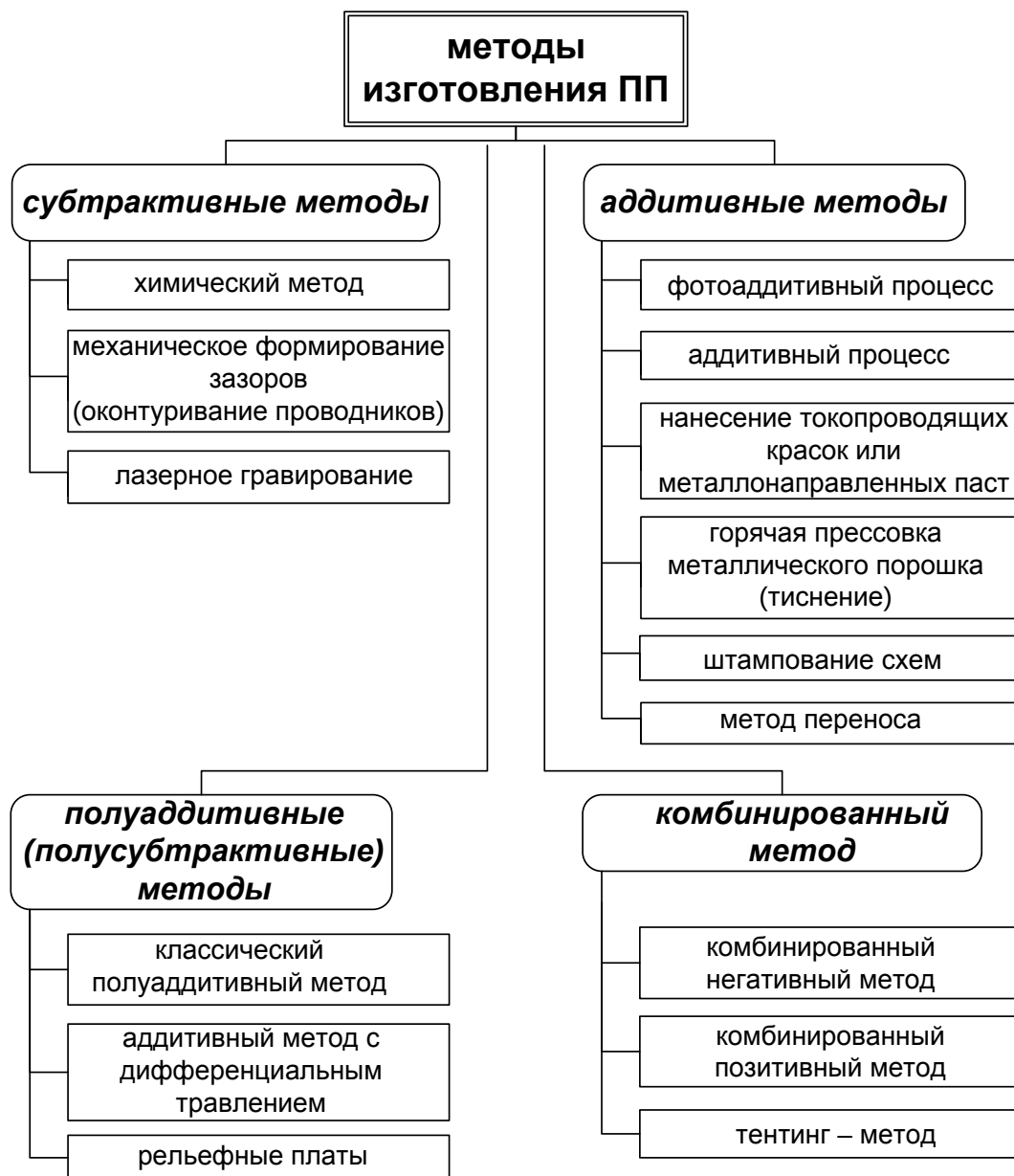


Рис. 4.3. Классификация технологий ПП.

Структурные схемы ТП изготовления двухсторонних, многослойных печатных плат, многослойных керамических и полиимидных плат.

Технологические процессы изготовления печатных плат

Для изготовления элементов проводящего рисунка ПП применяются две технологии: субтрактивная и аддитивная (рис. 4.4). *Субтрактивный процесс* – получение проводящих рисунков путем избирательного травления участков фольги с пробельных мест. *Аддитивный процесс* – получение проводящего рисунка путем избирательного осаждения проводникового материала на нефольгированный материал основания.

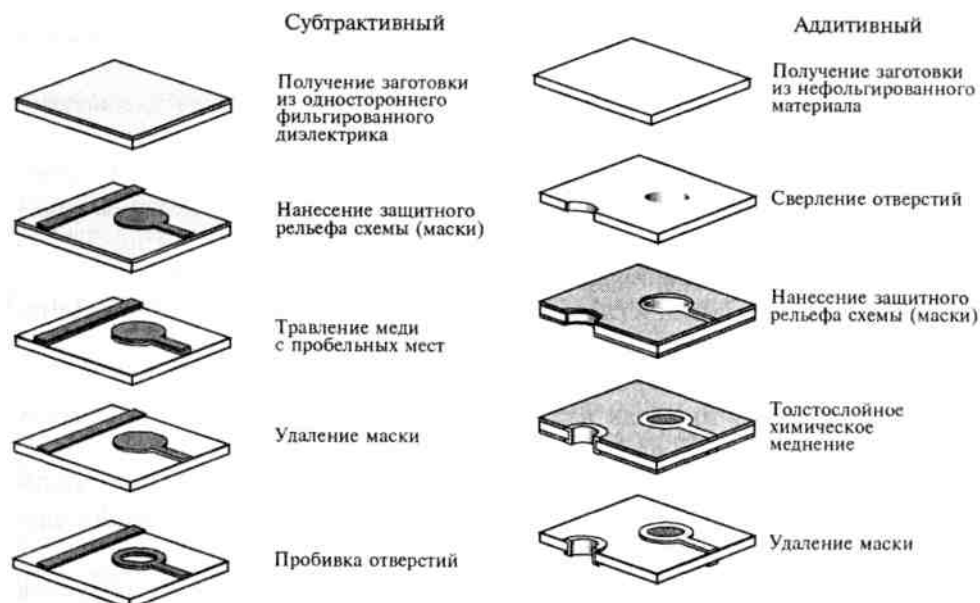


Рис. 4.4. Методы изготовления проводящих слоев печатных плат

Двусторонние печатные платы (ДПП).

ДПП применяют практически во всех видах ЭА. ДПП 1-, 2- и 3-го классов точности изготавливают в мелко серийном, серийном и крупносерийном производстве, 4- и 5-го – в серийном, прецизионные – в мелкосерийном производстве. Максимальные габариты ДПП 500х600 мм, минимальный диаметр отверстий – 0,4 мм. Материалы основания ДПП – фольгированный гетинакс (ГФ), фольгированный стеклотекстолит (СФ). Для прецизионных ДПП применяют материалы с толщиной фольги 5 мкм или нефольгированные диэлектрики. Гибкие ДПП выполняют на гибком тонком фольгированном или нефольгированном основании. В табл. 4.1 приведены основные этапы ТП изготовления ДПП на жестком фольгированном основании комбинированным позитивным методом.

Таблица 4.1.

Основные этапы ТП изготовления ДПП на фольгированном основании комбинированным позитивным методом

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскиз этапа
1	Входной контроль диэлектрика		
2	Получение заготовок	1. Резка 2. Штамповка 3. Лучом лазера (для прецизионных ПП)	
3	Получение базовых отверстий	Сверление	
4	Получение монтажных отверстий	Сверление	
5	Металлизация предварительная	1. Магнетронное напыление 2. Термолиз	

		3. Химическое меднение 3...5 мкм 4. Химиико-гальваническое меднение	
6	Подготовка поверхности	1. Суспензия пемзового абразива 2. Подтравливание	
7	Получение защитного рельефа	1. СГ 2. ФХ с органопроявляемым СПФ 3. ФХ щелочепроявляемым СПФ С СПФ лазерного экспонирования (для прецизионных ПП)	
8	Электрохимическая металлизация	1. Гальваническое меднение и нанесение металлорезиста 2. Гальваническое меднение и нанесение полимерного травильного резиста	
9	Удаление защитного рельефа		
10	Травление меди с пробельных мест		
11	Нанесение защитной паяльной маски	СГ	
12	Лужение		
13	Отмывка флюса		
14	Получение крепежных отверстий и обработка по контуру	1. Лазерная обработка 2. Сверление отверстий и фрезерование по контуру	
15	Промывка	Ультразвуковой метод	
16	Контроль электрических параметров		

Примечание. СПФ – сухой пленочный фоторезист.

Комбинированный позитивный метод применяют также при изготовлении наружных слоев МПП методом металлизации сквозных отверстий (ММСО), попарного прессования, послойного наращивания и др.

При изготовлении ДПП на нефольгированном основании применяют методы, позволяющие получить ПП по 4-му и 5-му классам точности: электрохимический (полуаддитивный), аддитивный, фотоформирование, тентинг-метод, с использованием активирующих паст и др.

Многослойные печатные платы (МПП).

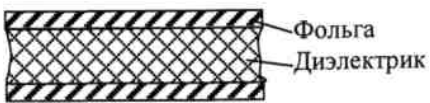
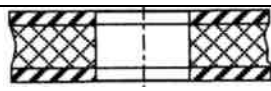
МПП состоят из нескольких сигнальных слоев, разделенных изоляционными прокладками и, при необходимости, слоями электропитания и экранирующими слоями. Вследствие высокой плотности размещения печатных проводников МПП обладают высокой коммутационной способностью. К достоинствам применения МПП можно отнести возможность передачи наносекундных сигналов без существенных искажений и потерь, высокую устойчивость к внешним воздействиям, снижение количества внешних контактов. Следует отметить и недостатки МПП: высокая стоимость, повышенная трудоемкость проектирования и изготовления, высокие требования к исходным материалам и точности изготовления печатных проводников и переходных отверстий и т.д.

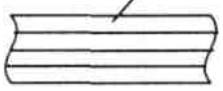
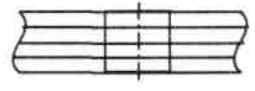
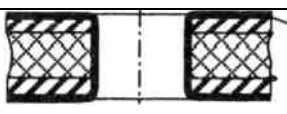
Широкое применение в ЭА нашли методы: металлизации сквозных отверстий, открытых контактных площадок, попарного прессования, послойного наращивания рисунка и МПП с выступающими выводами. Название эти виды МПП получили соответственно технологическим методам изготовления.

Базовым технологическим процессом изготовления МПП является метод металлизации сквозных отверстий, этапы выполнения которого приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Основные этапы ТП изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий.

№	Основные этапы	Возможные способы получения	Эскизы этапа
	<i>Изготовление слоев (п. 1—12)</i>		
1	Входной контроль диэлектрика		
2	Получение заготовок слоев	1. Штамповка 2. Резка	 Фольга Диэлектрик
3	Получение базовых и технологических отверстий	1. Штамповка 2. Сверление	
4	Получение переходных отверстий	1. Лазер 2. Сверление	
5	Предварительная металлизация	1. Магнетронное напыление 2. Химическое меднение 3...5 мкм	 Металл
6	Электрохимическая металлизация	Гальваническое меднение	 Гальваническая медь
7	Подготовка поверхности слоев	1. Химический способ 2. Суспензия пемзового абразива	
8	Получение защитного рельефа	1. СГ 2. Офсетная печать 3. ФХ: СПФ органопроводяемый СПФ щелочепроводяемый	
9	Травление меди с пробельных мест		

10	Удаление защитного рельефа		
11	Подготовка поверхности слоев	1. Подтравливание 2. Оксидирование 3. Суспензия пемзового абразива	
12	Сушка	1. Термическая 2. В инертной среде	
13	Прессование слоев	1. Гидравлическое 2. Гидравлическое с вакуумированием 3. Вакуумное автоклавное	
14	Сверление и подготовка сквозных отверстий	1. Гидроабразивная обработка и подтравливание диэлектрика в отверстиях 2. Промывка водной суспензией высокого давления и плазменная очистка отверстий	
15	Предварительная металлизация	1. Магнетронное напыление 2. Химическое меднение 3..5 мкм 3. Химико-гальваническое меднение	
Далее – см. табл. 4.1, начиная с п. 8			

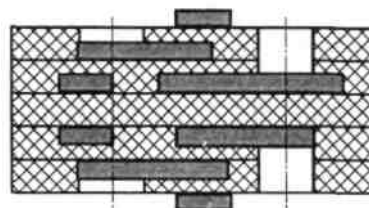
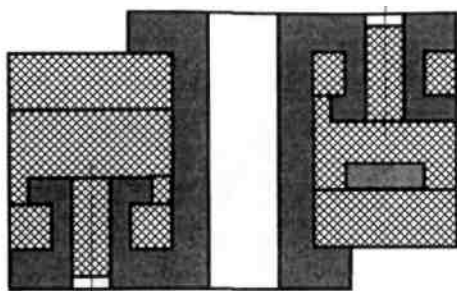


Рис. 4.5. МПП, изготовленная методом попарного прессования

Рис. 4.6. МПП с открытыми контактными площадками

При изготовлении МПП *методом попарного прессования* (рис. 4.5) сначала получают две двусторонние ПП с металлизированными отверстиями, затем их прессуют вместе с размещенной между ними изоляционной прокладкой.

Полученный пакет сверлят, полученные отверстия очищают, затем металлизуют. Таким образом осуществляют электрические соединения между наружными слоями. К недостаткам этого метода изготовления МПП можно отнести длительный технологический цикл последовательного выполнения операций, большое количество химико-гальванических операций.

Особенностью конструкции МПП с *открытыми контактными площадками* (рис. 4.6) является отсутствие электрической связи между слоями и ее появление только после установки и пайки выводов микросхем и ЭРЭ к контактным площадкам любого из слоев. Каждый слой (их может быть более двадцати) изготавливают на одностороннем фольгированном диэлектрике химическим негативным методом. Отверстия в слоях (круглые – для штыревых и прямоугольные – для планарных выводов) получают штамповкой. После сборки, совмещения и склеивания слоев клеем БФ-4 на специальном приспособлении обеспечивается доступ к контактным площадкам внутренних слоев. Для увеличения площади контакта диаметр контактной площадки должен быть больше диаметра отверстия.

К достоинствам МПП с открытыми контактными площадками следует отнести большое число слоев, ремонтпригодность, а к недостаткам – невысокий класс точности.

В МПП с *выступающими выводами* электрическая связь между слоями осуществляется печатными проводниками внутренних слоев, отогнутых на наружный слой МПП и закрепленных изоляционными накладками (рис. 4.7). К преимуществам данного метода относятся большое число слоев (15), высокая механическая прочность, возможность параллельного выполнения операций.

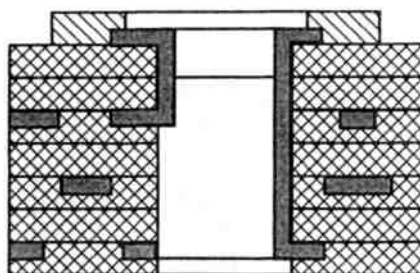


Рис. 4.7. МПП с выступающими выводами послойного наращивания

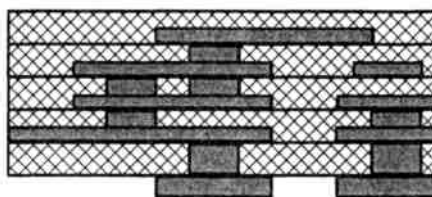


Рис. 4.8. МПП, изготовленная методом

Процесс изготовления МПП *методом послойного наращивания* (рис. 4.8) выполняется следующим образом. Сначала на первый слой перфорированного диэлектрика напрессовывается медная фольга с одной стороны и проводится операция химико-гальванического меднения. При этом медь полностью заполняет отверстия в диэлектрике и осаждается на поверхности диэлектрика, свободной от медной фольги. На этом сформированном проводящем слое химическим негативным методом выполняется рисунок схемы, затем напрессовывается второй слой перфорированного диэлектрика, проводится химико-гальваническое меднение отверстий и поверхности диэлектрика второго слоя, выполняется рисунок второго слоя и т.д. Связь между слоями осуществляется при помощи столбиков меди в отверстиях.

К преимуществам этого метода изготовления МПП относятся надежность межслойных соединений, большое число слоев, к недостаткам – длительный технологический цикл, невозможность использования элементов со штыревыми выводами, высокая стоимость изготовления.

Компоновочные схемы функциональных ячеек (ФЯ) цифровых РЭС на корпусированных ИС и МСБ и бескорпусных МСБ.

Выбор типоразмера печатной платы.

В современных бортовых РЭС применяются конструкции функциональных ячеек (ФЯ) 3-го и 4-го поколений. Конструкции ФЯ 3-го поколения характеризуются применением корпусированных интегральных схем (ИС) и миниатюрных электрорадиоэлементов (ЭРЭ), расположенных на печатных платах с высокой разрешающей способностью печатных проводников (до 0,1 мм). Конструкции ФЯ 4-го поколения характеризуются применением микросборок, объединяющих бескорпусные ИС и микроминиатюрных планарных ЭРЭ, расположенных на монтажной плате (подложке). В современных бортовых РЭС по конструктивам ФЯ 3-го поколения выполняются, в основном, цифровые ячейки. Рассмотрим основные особенности конструктивов ячеек 3-го поколения для цифровых РЭС и связанные с ними правила конструирования.

Первой особенностью этих конструктивов является **регулярность компоновки**, т.е. размещение основных базовых элементов конструкции, например ИС, на несущей конструкции – печатной плате рядами и столбцами, вызванная регулярностью построения самой схемы устройства. Такая же регулярность компоновки соблюдается и при размещении ФЯ в блоки, а блоков – в стойки и шкафы.

Второй особенностью следует считать **планарность формы основного типового элемента замены (ТЭЗ)** – функциональной ячейки, обусловленную применением корпусированных ИС широкого применения плоской прямоугольной формы.

Третья особенность таких конструктивов состоит в том, что **они используются для создания цифровых РЭС**, как правило, наземного применения в виде многоблочных крупногабаритных устройств и комплексов, например, наземных ЭВМ. Это накладывает свой отпечаток на габариты печатных плат (наиболее употребительными размерами их являются 170x110 мм и 170x200 мм, хотя в ряду рекомендуемых есть и меньшие размеры).

Четвертой особенностью конструктивов является **наличие значительных тепловых напряженностей** в них, поскольку в многоблочных конструкциях общее число компактно расположенных микросхем может достигать нескольких тысяч, что часто требует дополнительных систем охлаждения, например принудительной вентиляции.

Наконец, **пятой особенностью конструктивов** являются требования повышенной эксплуатационной взаимозаменяемости ТЭЗ, ремонтпригодности и технологичности конструкций, что приводит к необходимости конструирования унифицированных базовых несущих конструкций (БНК), а также применения наиболее употребительной разъемной компоновки блоков.

Основным преимуществом конструкций ФЯ 4-го поколения является возможность существенного уменьшения объема и массы по сравнению с конструкциями ФЯ 3-го поколения. Одновременно повышается и надежность изделий за счет уменьшения числа паяных соединений и увеличения интеграции микросборок. Вместе с тем появляется ряд специфических особенностей и требований к новым конструкциям.

Рассмотрим их более подробно.

Значительное уменьшение объема в цифровых ФЯ с одновременным увеличением быстродействия их работы, а, следовательно, и увеличением потребляемой мощности приводит к резкому возрастанию тепловой напряженности в них и нарушению нормального теплового режима, что вызывает отказы в работе. Поэтому **первой специфической чертой новых конструкций цифровых ФЯ является наличие в них мощных и эффективных теплоотводов.** Такими теплоотводами являются металлические основания под бескорпусными МСБ и, в частности, металлические рамки. Эти рамки, как правило, выполняют из алюминиевых сплавов АМг, АМц, В95, имеющих высокие значения коэффициентов теплопроводности (160...180 Вт/(м·К)).

Вторая специфическая особенность этих конструкций заключается в том, что размещаемые на металлических рамках бескорпусные МСБ (порядка восьми и более штук) имеют **значительное количество сигнальных входов и выходов**, а также **шин питания и земли** (порядка 24...30 с одной МСБ), что приводит к появлению в конструкции большого числа тонких ($d = 30...50$ мкм) соединительных проводников, с одной стороны приваренных (припаянных) к внешним контактным площадкам МСБ, а с другой – к «язычку» металлизированных отверстий печатной платы. При механических воздействиях, несмотря на небольшой прогиб этих проволочек, возможны отрывы в местах приварки (пайки), т.е. внезапные отказы в соединениях и сбои во всей ячейке. Кроме того, увеличение интеграции микросборок, а следовательно, и площади самих подложек при постоянстве их толщины, опять-таки создает опасность их разрушения от ударов и вибраций. Чтобы обеспечить требования защиты конструкции от механических резонансов, усталостных напряжений, линейных перегрузок, в конструкциях ячеек 3-го

поколения используют те же металлические рамки, но характерной чертой их профиля является наличие ребер жесткости и окон, а сами МСБ и печатные платы клеят к этим рамкам антивибрационными компаундами типа КТ-102 или «Эластосил» для уменьшения коэффициентов динамичности рамок. Наконец, требование уменьшения массы заставляет делать эти рамки более ажурными.

Таким образом, спецификой конструкции ФЯ 4-го поколения цифрового типа является наличие легких и прочных металлических рамок, гарантирующих достаточный теплоотвод, вибро- и ударопрочность ячеек, обеспечиваемая тем, что рамки изготавливаются из сплава высокого демпфирования 15ХЮ-ИД. Обычно вибро- и ударопрочность обеспечиваются при выполнении допустимых амплитуды колебаний элементов конструкции не более 0,3 мм и виброскорости не более 800 мм/с. Диапазон же частот вибраций широк (от 30...50 Гц до 0,5...5 кГц) при возможных перегрузках до 30...40 единиц. Допустимая удельная мощность рассеивания в ФЯ может достигать величины 60 Вт/дм.

На рис. 4.9 показана конструкция металлической рамки, а на рис. 4.10 представлена схема установки и монтажа бескорпусных МСБ на ней.

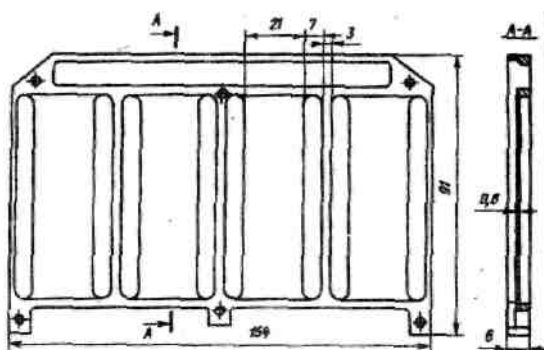


Рис. 4.9. Металлическая рамка

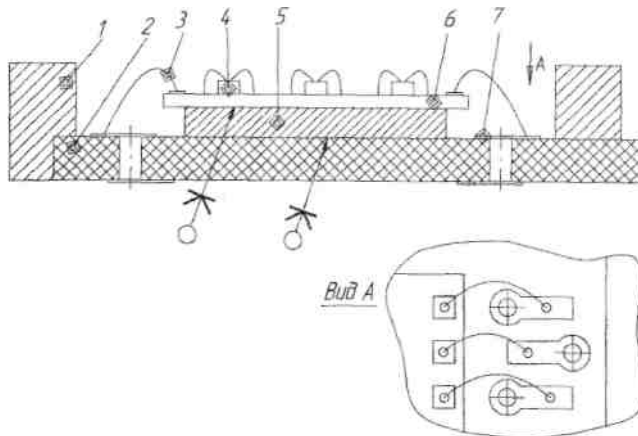


Рис. 4.10. Схема установки и монтажа бескорпусных МСБ на металлической рамке:

1 – ребро рамки; 2 – печатная плата; 3 – соединительный проводник;

4 – бескорпусная ИС; 5 – планка; 6 – подложка; 7 – металлизированное отверстие

Таким образом, в процессе конструирования ФЯ решают следующие основные задачи:

- выбор варианта конструкции ячейки;
- расчет типоразмера печатной платы;
- выбор типа электрического соединителя, элементов крепления, фиксации и контроля;
- выбор метода изготовления печатной платы;
- обеспечение нормального теплового режима;
- защиту конструкции ячейки от влияния факторов внешней среды.

Выбор варианта конструкции ячейки зависит от требований ТЗ на блок, в котором она используется, и главным образом от назначения и условий эксплуатации устройства. В зависимости от заданной формы и габаритов блока на первых стадиях разработки могут быть ориентировочно установлены размеры печатной платы ФЯ и их число в блоке. По заданной электрической схеме выбирают тип корпуса ИС и рассчитывают нагрузку на печатную плату, а далее проводят расчет вибропрочности ФЯ. Исходя из полученных результатов расчета и выбранного типа корпуса ИС осуществляют выбор варианта конструкции ФЯ (с рамкой, без рамки, одно- или двухстороннее расположение элементов).

Расчет типоразмера печатной платы проводят по количеству ИС в ячейке, выбранному типу корпуса, числу задействованных выводов, толщине печатной платы и подбирают по ГОСТ приемлемые размеры печатной платы.

Выбор типа электрического соединителя ФЯ зависит от принятой компоновки их в блок (разъемной или книжной), а также с учётом элементной базы и техники монтажа. В случае книжной конструкции применяют гибкие шлейфы либо гибкие кабели.

Выбор элементов фиксации и контроля проводят по рекомендациям ОСТ 4ГО.010.009 – ред. 3-76. Метод изготовления печатной платы выбирают по количеству возможно размещаемых корпусов ИС на выбранной ее площади и по разрешающей способности печати.

Задача обеспечения теплового режима ФЯ решается путем теплового расчета в комплексе всего блока, однако, существуют и некоторые общие установки по размещению элементов на печатной плате и самих ячеек в блоке:

- теплонагруженные навесные ЭРЭ необходимо располагать по периметру печатной платы;
- при применении ИС с высоким тепловыделением под их корпусами необходимо обеспечивать наличие теплоотводящих шин, соединенных в общий коллектор тепла;
- вертикальное расположение самих ФЯ в блоке всегда предпочтительнее горизонтального.

Защита конструкции ФЯ от влияния факторов внешней среды, особенно влаги, требует обеспечения гидрофобности поверхности печатной платы и самих компонентов. Наличие влаги с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 80$ может резко увеличить паразитную погонную емкость между печатными проводниками, следовательно, ухудшить быстродействие, и при большом количестве влаги создать короткое замыкание между ними. Поэтому чаще всего ФЯ покрывают полиуретановыми лаками с хорошими высокочастотными свойствами ($\varepsilon = 2,2$ и $tg\delta = 2 \cdot 10^{-4}$), например, Р-231.

При сочетании действия влаги и повышенной температуры рекомендуют применение фторопластовых лаков ТУ-051884-80 типа ЛФ-32.

Компоновочные схемы ФЯ аналоговых РЭС на корпусированных ИС и МСБ и бескорпусных МСБ.

Специфическими особенностями конструкций субблоков аналогового типа, в частности приемно-усилительных трактов (субблоков **УВЧ**, **УПЧ**, **УНЧ**) являются удлиненная форма субблоков, наличие тонкостенных экранов между узлами и экранов самих субблоков. При весьма малых по величине сигналах на входе УВЧ (порядка 10^{-6} В) и требуемой величине на выходе УНЧ (десятичные доли вольта) необходимо иметь усиление всех трактов свыше 100 дБ, а только в одном УПЧ – порядка 60 и более децибел, что трудно обеспечить на одной промежуточной частоте в малом замкнутом

объеме субблока. Поэтому применяют двойное преобразование частоты, располагают каскады в линию и вводят экраны, развязывающие фильтры между ними.

В любом из перечисленных субблоков должны быть частотно-избирательные узлы, селектирующие сигналы, область применения которых поясняет рис. 21. В качестве таких узлов на УВЧ и УПЧ могут использоваться катушки индуктивности (пленочные, каркасные, тороидальные), фильтры упругих и поверхностных волн на пьезоэлектриках, полосовые фильтры на операционных усилителях (активные RC-фильтры) и др. Катушки индуктивности пленочного типа имеют малый диапазон индуктивности (от 1 до 10 $\mu\text{Г}$) и малую добротность (не более 20); тороидальные катушки могут быть малогабаритными и малой высоты (не более 2...3 мм), однако использование в них ферритов с большой магнитной проницаемостью приводит к значительной температурной нестабильности этой величины, а далее и к нестабильности самой индуктивности и частоты настройки. Каркасные же катушки индуктивности в виде цилиндров с намотанной обмоткой по своим электрическим параметрам не могут иметь конструктивную высоту катушки менее 8... 10 мм. Эта высота резко снижает качественные показатели по объему и массе (растут коэффициенты дезинтеграции), и конструкция становится объемной.

Наиболее совместимыми по высоте являются фильтры ПАВ и интегральные кварцевые фильтры ($h_k = 3...4$ мм), которые могут быть размещены в тех же корпусах, что и корпусированные ИС либо скомпонованы в одном корпусе-экране с бескорпусными аналоговыми МСБ, на подложках которых часто размещают навесные конденсаторы серии К10, которые сами имеют высоту 0,6...2,5 мм. Выполнение всех этих требований в конструкциях аналоговых субблоков приводит почти однозначно к пенальной форме субблоков.

Конструктивно аналоговые субблоки 3-го поколения выполняют на ПП удлиненной формы с установленными на них корпусированными ИС, обрамляющими их навесными ЭРЭ и частотно-избирательными узлами (каркасными или тороидальными катушками индуктивности, корпусированными пьезофильтрами и т.п.).

После сборки и пайки ИС и радиокомпонентов на печатной плате субблок обычно покрывают полиуретановым лаком УР-231, который имеет небольшую диэлектрическую проницаемость (порядка 2,5) и поэтому не вносит значительных дополнений в паразитные емкости между проводниками. Являясь гидрофобным покрытием, он защищает поверхность субблока от проникновения влаги с $\varepsilon = 80$, тем самым, устраняя не только гидролизные процессы между проводниками, но и защищая субблок от самовозбуждения.

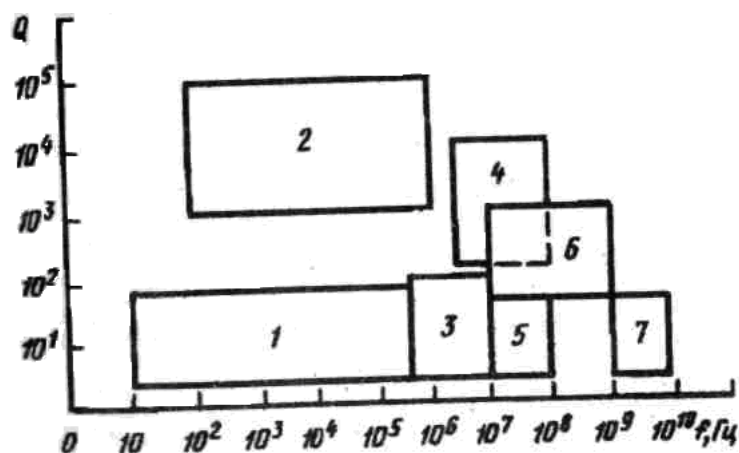


Рис. 4.11. Области применения частотно-избирательных узлов:

1 – активные RC-фильтры; 2 – цифровые фильтры; 3 – каркасные катушки индуктивности; 4 – интегральные пьезо-фильтры; 5 – пленочные катушки индуктивности; 6 – фильтры на поверхностных акустических волнах; 7 – микрополосковые фильтры

На рис. 4.11 показана условная конструкция субблока 3-го поколения.

Конструкции аналоговых субблоков на бескорпусных микросборках выполняют обычно в виде металлических пеналов, герметизируемых либо по торцам, либо по верхней крышке. Сами МСБ приклеивают на металлическое основание, а монтаж между ними осуществляют либо по принципу «непрерывной микросхемы», либо с помощью печатных вставок между ними и корпусом, на которых устанавливают также навесные ЭРЭ, которые нельзя выполнить в пленочном исполнении. Соединения с другими субблоками осуществляют радиочастотными соединениями типа СР50 и радиочастотными кабелями РК50 или РК75. Низкочастотные цепи питания часто осуществляют через индивидуальные соединители типа «слезка». На рис. 4.13 показана конструкция аналогового субблока, скомпонованного по «непрерывной микросхеме», а на рис. 4.14 – с использованием фильтра ПАВ.

Компоновка аналоговых блоков РЭС зависит, прежде всего, от их назначения в составе конкретного радиоизделия. Они могут дополнять первые каскады СВЧ-устройств, могут быть самостоятельными первыми каскадами в обычных радиовещательных и телевизионных приемниках, могут объединяться и с последующими цифровыми блоками обработки информации. Поэтому говорить о какой-либо унификации конструктивных решений аналоговых блоков РЭС не приходится. Как для блоков 3-го поколения, так и для блоков 4-го поколения существуют те же самые приемы общего корпусирования, герметизации и защиты от факторов внешней среды, что и для цифровых блоков. На рис. 4.15 показана этажерочная конструкция блока приемопередающего устройства, выполненная на бескорпусных МСБ.

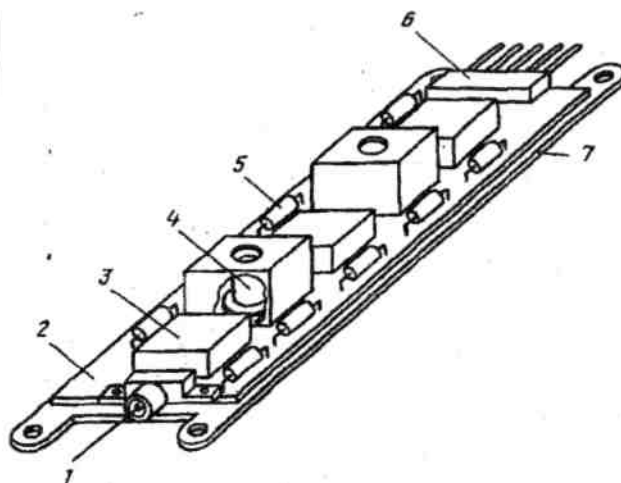


Рис. 4.12. Конструкция аналогового субблока 3-го поколения:

- 1 – радиочастотный соединитель; 2 – печатная плата; 3 – корпусированная ИС;
4 – каркасная катушка индуктивности с экраном; 5 – навесной ЭРЭ; 6 – низкочастотный соединитель; 7 – основание

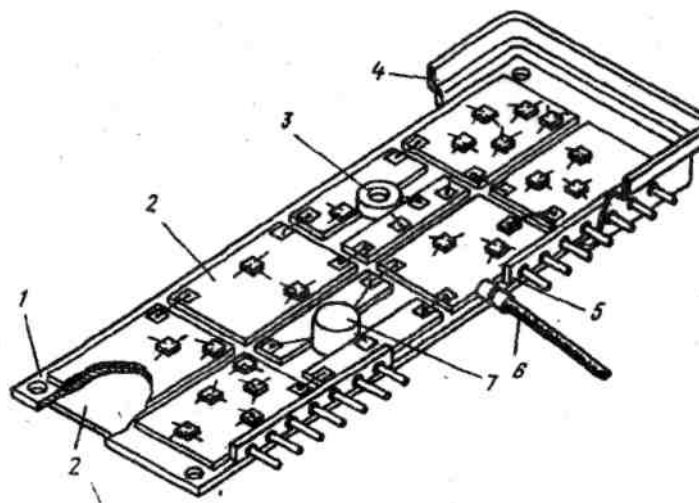


Рис. 4.13. Конструкция аналогового субблока 4-го поколения по «непрерывной микросхеме»: 1 – металлическое основание; 2 – микросборка; 3 – тороидальная катушка индуктивности; 4 – корпус-экран; 5 – соединитель; 6 – радиочастотный кабель; 7 – конденсатор

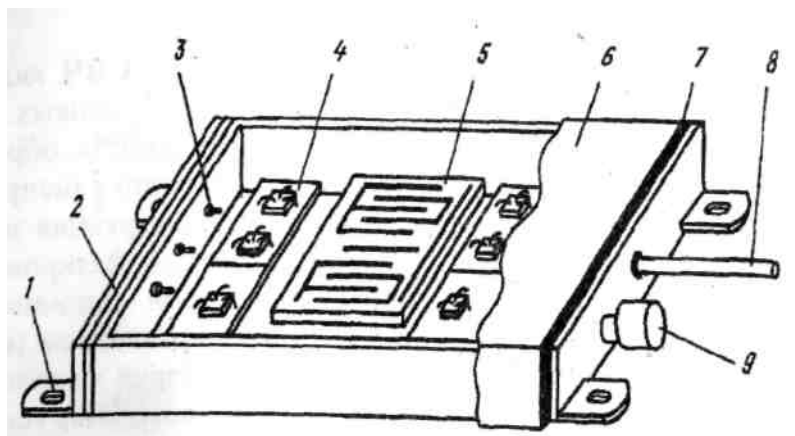


Рис 4.14. Конструкция аналогового субблока 4-го поколения с фильтрами ПАВ: 1 – лапка крепления; 2 – каркас-основание; 3 – гермоввод «слезка»; 4 – микросборка; 5 – фильтр ПАВ; 6 – кожух-экран; 7 – паяный шов; 8 – трубка-штенгель; 9 – высокочастотный разъем с полиэтиленовой заглушкой

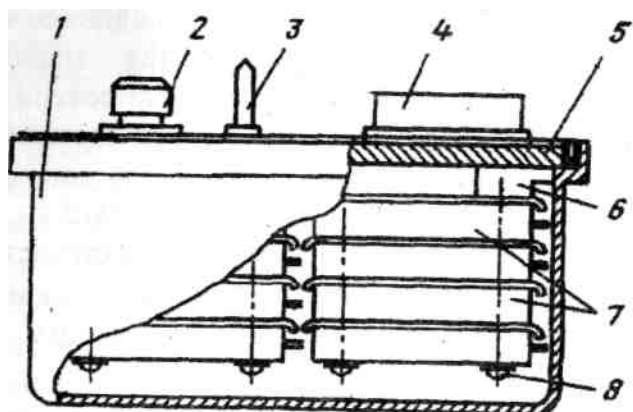


Рис. 4.15. Этажерочная конструкция блока приемопередающего устройства 4-го поколения: 1 – кожух; 2 – высокочастотный разъем с полиэтиленовой заглушкой; 3 – трубка-штенгель; 4 – низкочастотный разъем; 5 – крышка-основание; 6 – бобышка; 7 – субблоки; 8 – стяжной винт

Базовые несущие конструкции ФЯ.

Для бортовых РЭС в соответствии с ГОСТ 26765.11–86 рекомендуются следующие типоразмеры ПП (мм) (Табл. 4.3):

Таблица 4.3

Типоразмерный ряд корпусов блоков.

Условное обозначение типа корпуса блока	Габаритные размеры, мм			
	h	h _{МАКС}	H	B
				57,0
1,5M				90,5
2M	249	251,5	194	124,0
2,5M			157	7.6

1МН			88	57,0
1К				57,0
1,5К				90,5
2К				124,0
2,5К			194	157,0
3К				190,5
4К	318	320,5		257,0
5К				324,0
2КН			88	124,0
1С				570,0
1,5С				90,5
2С				124,0
2,5С	419	421,5	19	157,0
3С				190,5
4С				257,0
5С				324,0
6С				390,5

Примеры конструкций (компоновочных схем) ФЯ:

Наиболее распространенными являются конструкции ФЯ для блоков разъемного и книжного типов.

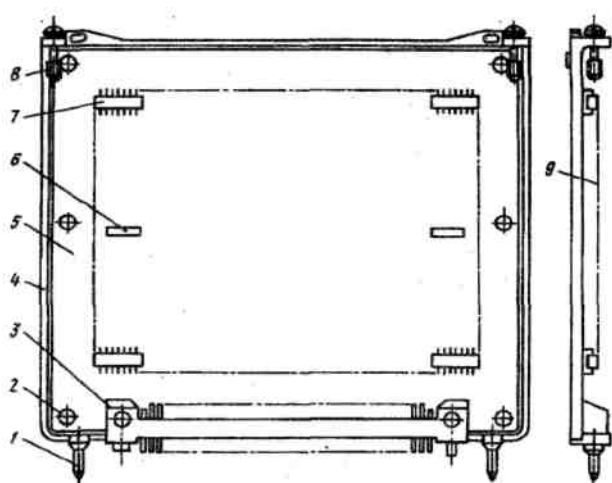


Рис. 4.16. Конструкция ФЯ блока разъемного типа с разъемным соединителем типа ГРПМ: 1 – штырь-ловитель; 2 – развальцованная заклепка; 3 – вилка соединителя ГРПМ; 4 – обечайка; 5 – печатная плата; 6 – навесные ЭРЭ; 7 – корпусированная ИС; 8 – невыпадающий винт; 9 – зона установки схемных элементов

Наиболее характерными компоновочными схемами цифровых ФЯ на бескорпусных микросборках являются односторонняя и двухсторонняя на металлической рамке и двухсторонняя на П-образном металлическом основании, а для блоков – книжная компоновочная схема:

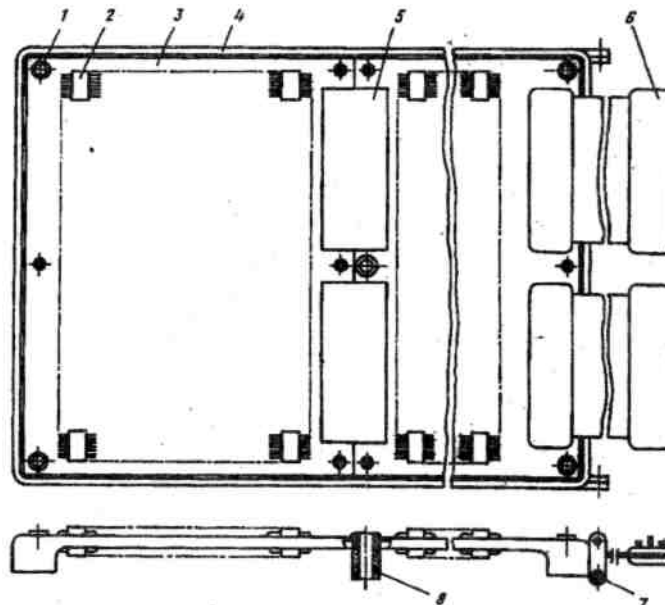


Рис. 4.17. Конструкция ФЯ блока книжного типа:
1 – развальцованная заклепка; 2 – корпусированная ИС; 3 – печатная плата;
4 – обечайка; 5 – отрезок гибкого шлейфа; 6 – колодка гибкого шлейфа;
7 – элемент шарнирного крепления; 8 – упорная втулка

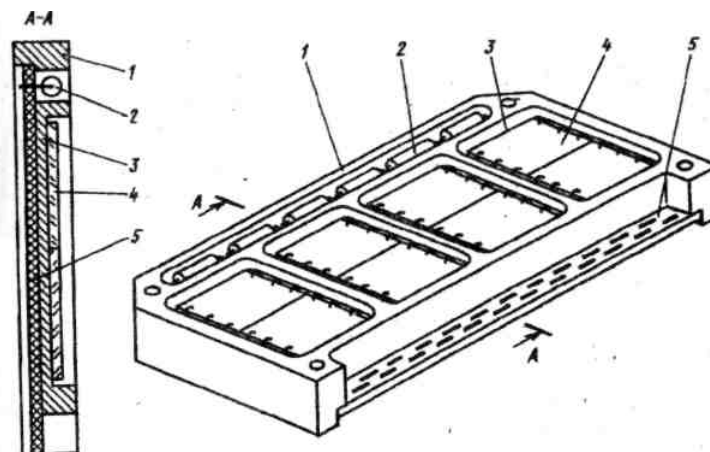


Рис. 4.18. Конструкция односторонней ФЯ на металлической рамке:
1 – рамка; 2 – навесной ЭРЭ; 3 – планка; 4 – микросборка; 5 – печатная плата

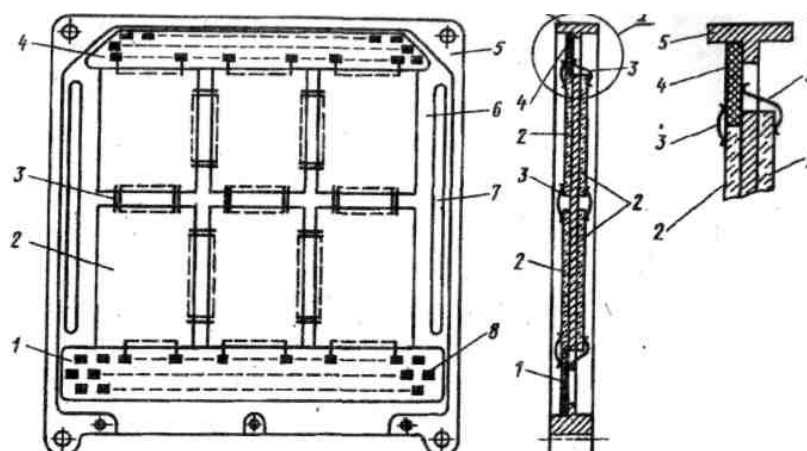


Рис. 4.19. Конструкция двухсторонней ФЯ на металлической рамке:
1 – нижняя печатная вставка; 2 – микросборка; 3 – соединительный проводник; 4 – верхняя печатная вставка; 5 – рамка; 6 – планка; 7 – выступ; 8 – контактная площадка

Конструкция двухсторонней ФЯ на металлической рамке представлена на рис. 4.19. Ее отличие состоит в том, что в ней отсутствует общая объединительная плата, а монтаж и крепление бескорпусных МСБ проводится с двух сторон на одну широкую продольную планку с минимальными зазорами между стыкуемыми МСБ. Применение таких конструкций рекомендуют для мелкосерийного производства, так как вязка жгутов плохо поддается автоматизации.

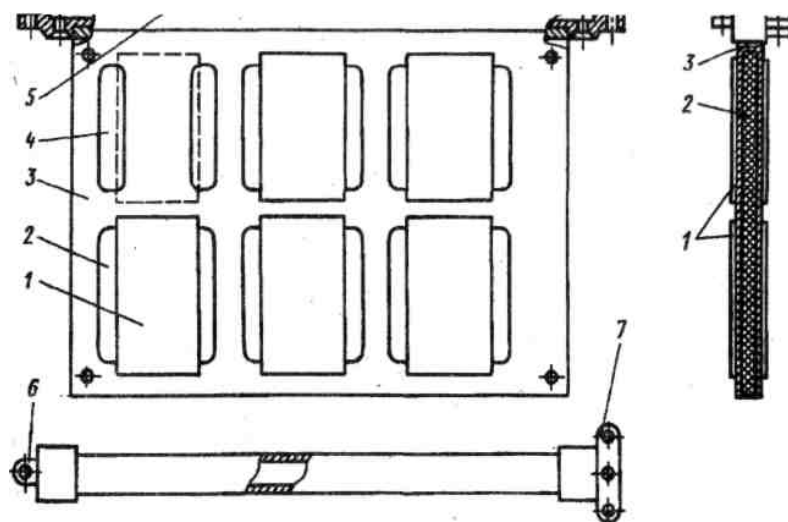


Рис. 4.20. Конструкция двухсторонней ФЯ на металлическом П-образном основании:
1 – микросборка; 2 – многослойная печатная плата; 3 – основание; 4 – окно для выводов;
5 – воздуховод; 6,7 – шарнирные соединения

Эта конструкция разработана (рис. 4.20) для цифровых РЭС с повышенной плотностью упаковки, поэтому в ней имеется приваренный сверху ячейки воздуховод коробчатого типа с входным и выходным отверстиями для циркуляции воздуха-охладителя через все ячейки в пакете.

Технология сборки и монтажа ФЯ.

Сборка и монтаж модулей первого уровня

Основным конструктивным элементом, образующим модули первого уровня (ТЭЗ, модули, ячейки) является односторонняя, двусторонняя или многослойная ПП, по одну или обе стороны которой размещаются МС, ЭРЭ, элементы коммутации и пр. Число МС и ЭРЭ, устанавливаемых на плату, может достигать десятков и сотен штук. В зависимости от вида внешних выводов МС и ЭРЭ их монтаж на поверхность ПП делят на штыревой, планарный и поверхностный (рис. 4.21).

Установка МС и ЭРЭ на ПП проводится в зависимости от типа производства ручным, механизированным, полуавтоматическим или автоматическим способом. Однако вне зависимости от способа монтажа необходимо выполнение следующих операций: комплектация элементов, устанавливаемых на плату, подготовка элементов к монтажу, установка элементов на плату и их фиксация, пайка, защита и контроль готового модуля.

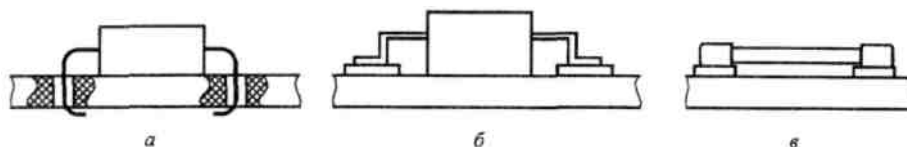


Рис. 4.21. Виды монтажа микросхем и ЭРЭ:
а – штыревой; б – планарный; в – поверхностный.

Компоновочные схемы блоков цифровых и аналоговых РЭС на корпусированных и бескорпусных ИС и МСБ.

Основные компоновочные схемы блоков

Под компоновкой блоков следует понимать взаимную ориентацию ячеек или других конструктивных зон (электрической коммутации, механических элементов и т.п.) в заданном объеме блока.

Основные компоновочные схемы блоков приведены на рис. 4.22. Полезный объем блока можно условно представить в виде четырех объемов: V_1 (пакет ФЯ), V_2 (электрические соединители и межъячеечный монтаж), V_3 (под элементами лицевой панели и соединительным монтажом установочных элементов), V_4 (под элементами задней панели, внешним электрическим соединителем и монтажом). Объем блока $V_{\text{бл}} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$.

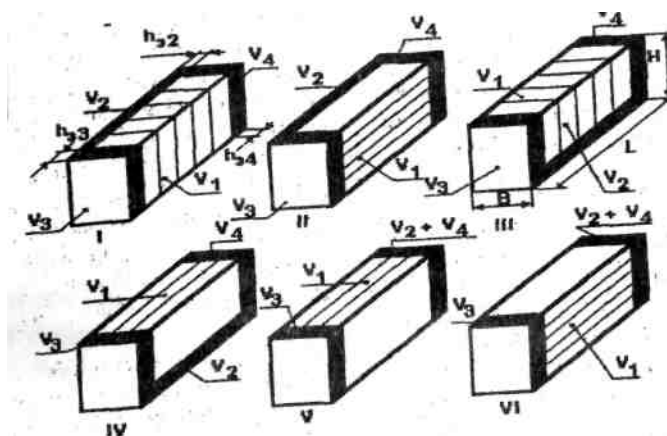


Рис. 4.22. Основные компоновочные схемы блоков.

Качество конструкции в большой степени будет зависеть от соотношения объемов V_1 и V_2 . Объем V_1 определяется объемом ФЯ, их количеством и шагом установки ФЯ в блоке. Для вариантов, представленных на рис. 4.22:

I и II:

$$V_1 = (L^1 - h_{33} - h_{34}) H^1 (B^1 - h_{32}); V_2 = (L^1 - h_{33} - h_{34}) h_{32} H^1;$$

III и IV:

$$V_1 = (L^1 - h_{33} - h_{34}) (H^1 - h_{32}) B^1; V_2 = (L^1 - h_{33} - h_{34}) h_{32} B^1;$$

V и VI:

$$V_1 = (L^1 - h_{32} - h_{33} - h_{34}) H^1 B^1; V_2 = (h_{32} + h_{34}) H^1 B^1.$$

Из представленных формул видно, что предпочтительными являются варианты V и VI и наименее рациональны варианты I и II, так как в блоках РЭС, как правило, $L' > H'$, $L' > B'$ и $H' > B'$. Отсюда получаем следующие зависимости:

$$V_1^{V,VI} > V_1^{III,IV} > V_1^{I,II}; V_2^{I,II} > V_2^{III,IV} > V_2^{V,VI}$$

Варианты II и VI не обеспечивают необходимые условия для эффективного отвода тепла, как при естественном охлаждении блока, так и принудительном воздушном. Для книжных конструкций при естественной конвекции предпочтительнее варианты IV и V. При этом в варианте V за счет установки электрического соединителя на короткой стороне ФЯ возможны трудности при трассировке ПП и увеличение паразитных связей печатного монтажа. Вариант IV может использоваться в случае принудительного охлаждения при установке вентилятора на заднюю или лицевую панель. Вариант V предпочтительнее при воздушном потоке снизу.

Для разъемной конструкции целесообразно использовать при естественной конвекции вариант компоновки III, а при необходимости использования принудительного охлаждения – вариант I.

Конструкции блоков бортовой РЭС 4-го поколения на бескорпусных микросборках являются конструкциями с большой плотностью упаковки элементов в объеме. Эта величина является одним из главных критериев качества конструкции и может составлять тысячи элементов в кубическом сантиметре для цифровых блоков и устройств.

Отличительной **особенностью блоков РЭС** на бескорпусных микросборках является необходимость **вакуумно-плотной герметизации блоков**, поскольку все активные и пассивные схемные элементы в бескорпусных микросборках не защищены от влияния факторов внешней среды, таких как солнечная радиация, фоновые излучения, теплоудары, влага, пониженное давление и др.

Другой особенностью подобных конструкций является **проблема тепловых режимов блоков**. Как уже отмечалось, при очень высокой плотности упаковки элементов в объеме в них создается значительная тепловая напряженность, способная привести к увеличению частоты отказов в аппарате. Все это требует увеличения эффективности способов теплопередачи конвекцией, лучеиспусканием и теплопроводностью. Если на уровне ФЯ в основном теплопередача определяется теплопроводностью и с этой целью конструируются теплопередающие рамки, то для блоков, имеющих собственные герметичные корпуса, основными видами теплопередачи служат конвекция и лучеиспускание, а в условиях невесомости – только лучеиспускание. Поэтому здесь значительная проработка конструкции должна вестись в направлении выбора оптимальной формы блока, для которой отношение поверхности теплоотдачи к объему было бы максимально возможным при сохранении и выполнении всех остальных требований на вибропрочность, технологичность, электромагнитную совместимость и др., накладываемых техническим заданием на конструирование.

Компоновочные схемы блоков РЭС

Блоки радиоэлектронной самолетной аппаратуры со съемными функциональными устройствами (модулями, субблоками) в настоящее время как в отечественной, так и в зарубежной практике имеют большое разнообразие конструктивных вариантов.

Наиболее распространенной формой выполнения функциональных субблоков является их конструкция в совокупности с элементами быстросъемного механического крепления при помощи невыпадающих винтов или других средств, а также способ их электрического сопряжения с общей схемой при помощи внутриблочных электросоединителей врубного типа.

В ряде случаев для удобства монтажа, регулировки и текущего обслуживания функциональные структурные единицы (субблоки, выполненные в виде печатных плат) имеют неразъемное электрическое сопряжение с общей схемой блока, но при этом имеют возможность поворота («откидывания») при помощи шарнирного сочленения с основной конструкцией, чем обеспечивается доступ к элементам схемы и монтажу.

Компоновки блоков можно иллюстрировать примерами, в которых съемные функциональные устройства сочетаются с габаритными узлами и элементами схемы, жестко установленными на несущую конструкцию. Это относится к конструктивно-компоновочным решениям для энергоемких блоков (усилитель мощности, антенные согласующие устройства и др.).

Компоновочные схемы блоков со съемными функциональными субблоками (модулями) свойственны для аппаратуры 2-го поколения.

Виды компоновочных схем:

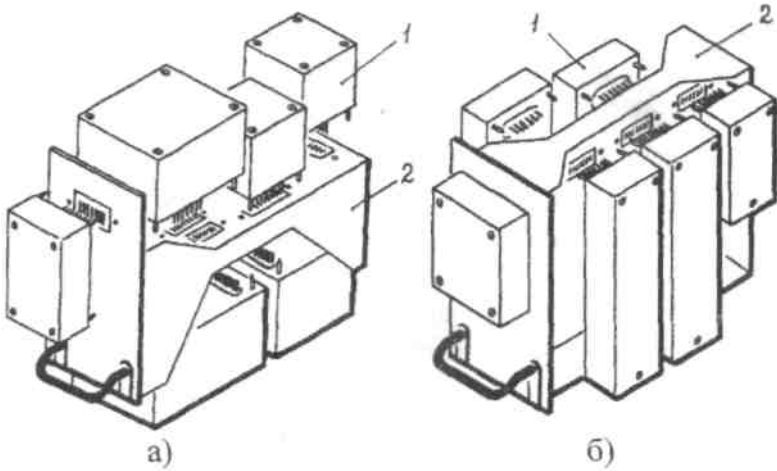


Рис. 4.23.

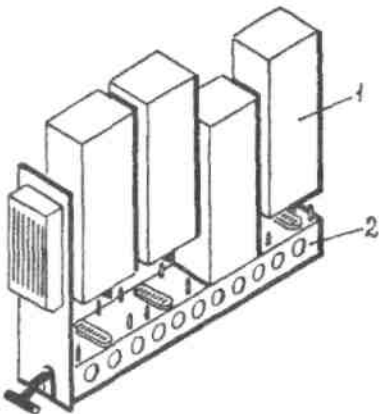


Рис. 4.24

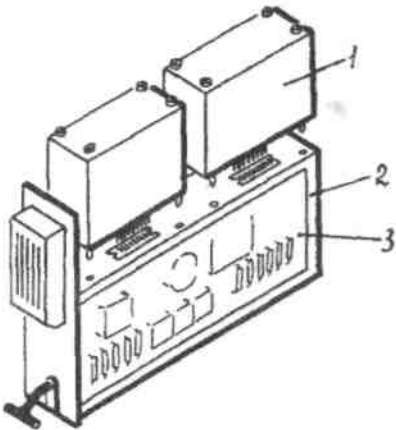


Рис. 4.25

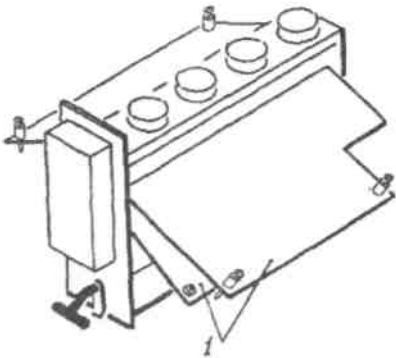


Рис. 4.26

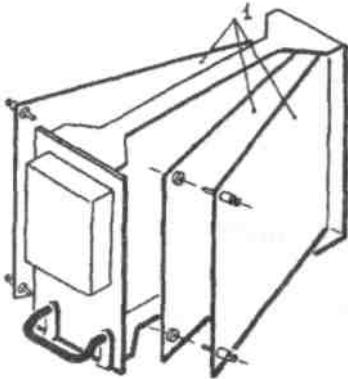


Рис. 4.27

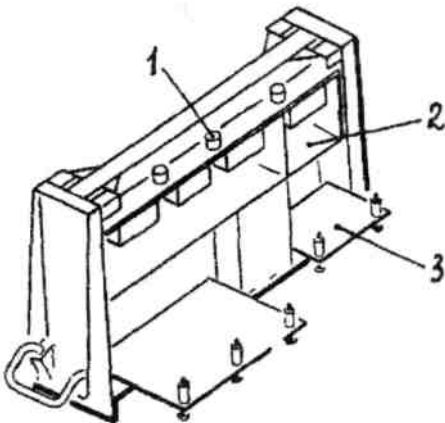


Рис. 4.28

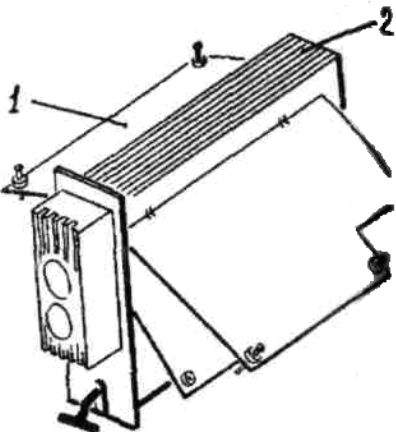


Рис. 4.29

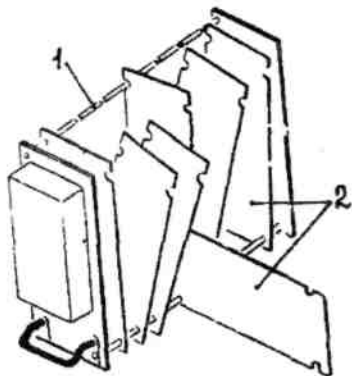


Рис. 4.30

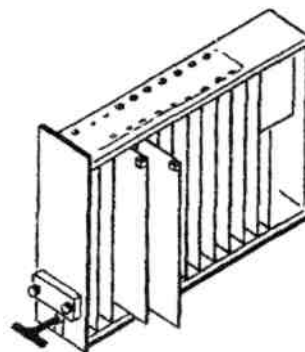


Рис. 4.31

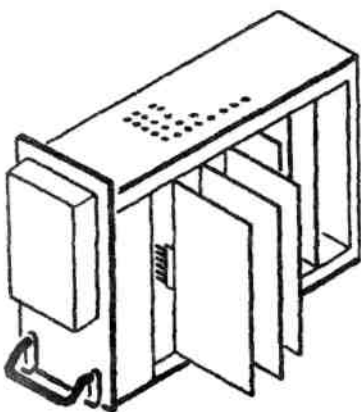


Рис. 4.32

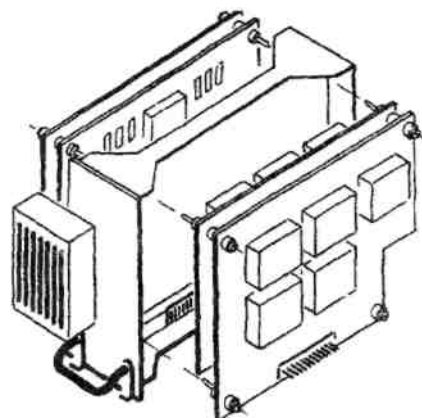


Рис. 4.33

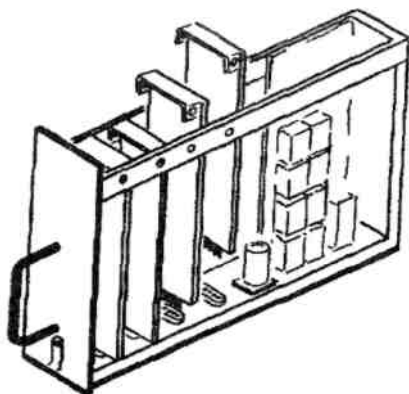


Рис. 4.34

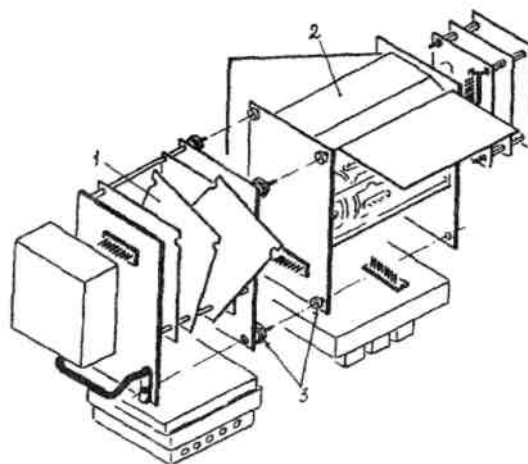


Рис. 4.35

Базовые несущие конструкции блоков.

Унификация несущих конструкций блоков

Унифицированная по конструктивному исполнению и типоразмерам несущая конструкция различных конструктивных уровней является базовой (БНК). БНК имеет ряд типоразмеров, построенных по определенному закону с сохранением полной конструктивной идентичности; допускаемая в ряде случаев конструктивная модификация должна обеспечивать единство технологии изготовления, применение единых материалов и сохранение стиля внешнего вида и оформления.

Единство требований, предъявляемых к БНК, позволяет обеспечить:

- наименьшую металлоемкость и массу;

- технологичность и возможность использования прогрессивных технологических приемов и процессов как для изготовления ее элементов, так и для осуществления сборочных операций в условиях автоматизированных производственных комплексов;
- максимальную жесткость конструкции;
- универсальность и высокую степень преемственности для блоков различного функционального назначения, используемой элементной базы, энергоемкости, методов обслуживания и условий размещения, способов охлаждения и т.п.;
- устойчивость к внешним климатическим воздействиям;
- доступ к элементам и узлам конструкции и схемного содержания блока;
- сокращение навесного монтажа между функционально-структурными единицами блока за счет печатного и шлейфового способов разводки коммутационных электрических соединений.

Лимитирующими факторами, определяющими выбор того или иного конструктива (несущей конструкции), являются различия аппаратуры по применению с учетом специфики условий эксплуатации, требований по размещению, по массе, технических требований и др.

Общепринято, что несущие конструкции выполняются специфично для аппаратуры морской, возимой, носимой, стационарной, авиационной, измерительной и аппаратуры средств проводной связи. Универсальность конструкторских решений допускает использование БНК, предназначенной для определенного типа аппаратуры. Авиационная аппаратура, выполненная в конструктиве БНК, может использоваться в качестве возимой или стационарной. Однако разнотипность конструктивных исполнений аппаратуры в пределах ее вида усложняет компоновку на носителях, ограничивает возможность унификации объектов, удорожает аппаратуру, усложняет эксплуатацию, ухудшает ремонтпригодность, резко увеличивает номенклатуру ЗИП, исключает взаимозаменяемость узлов, блоков и устройств.

Выполнение аппаратуры в оригинальных несущих конструкциях приводит к значительным трудовым и материальным затратам в результате большого объема разрабатываемой конструкторской и технологической документации, а также необходимой технологической оснастки. Отсутствие унификации несущих конструкций приводит в свою очередь к появлению многообразия типоразмеров ПП, технологической оснастки и невозможности организации централизованного производства элементов конструкции. Создание типовой БНК предусматривает максимальное снижение ее материалоемкости до уровня 6-8 % к массе блока и такое же снижение трудоемкости.

Единство конструктивного построения различной РЭС показывает принципиальную возможность создания базовых несущих конструкций для аппаратуры различного функционального назначения на основе базового метода конструирования РЭС. Лишь в этом случае реализуется возможность создания унифицированных узлов для РЭС различной категории и унифицированных базовых несущих конструкций блоков, устанавливаемых в аппаратуре различного назначения.

Для создания эффективных базовых несущих конструкций РЭС, отвечающих современным требованиям надежности, технологичности, миниатюризации, технической эстетики, эргономики, эксплуатации и стоимости необходимо:

- определить оптимальный в технико-экономическом отношении единый ряд типоразмеров блоков, устанавливаемых в различную аппаратуру;
- разработать единую конструкцию блоков для всех типоразмеров различной модификации (книжной, кассетной, разъемной);
- разработать единую конструкцию монтажных устройств.

Для всех несущих конструкций должна использоваться единая элементная база, единые типовые конструкторские решения.

Для них должны быть разработаны типовые технологические процессы и оснастка. Решение этих задач выполняется путем упорядочения и сокращения многообразия несущих конструкций и элементов на основе параметрических и типоразмерных рядов.

Таковы общие положения, касающиеся базовых конструкций применительно для всей электронной аппаратуры любого назначения.

Примеры решения конструктивного оформления блоков зарубежных фирм приведены на рисунках.

На рис. 4.36 показана аппаратура ДМВ диапазона фирмы «Вилкоккс». Обращает на себя внимание общность конструкции корпусов блоков и единый стиль их внешнего оформления.

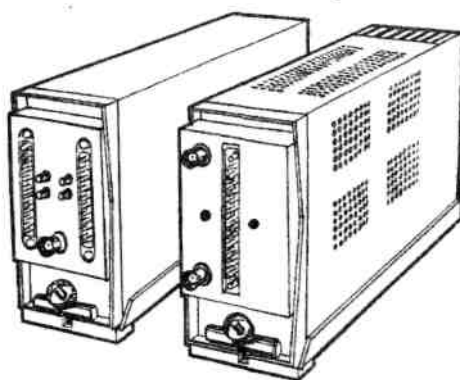


Рис. 4.36.

Анализируя конструктивные особенности зарубежного бортового радиоэлектронного оборудования разработки и серийного выпуска, начиная с 60-х годов вплоть до настоящего времени, полезно остановиться на решениях конструктивного исполнения корпусов блоков оборудования фирмы «Коллинз», выпускающей комплекс изделий МВ и ДКМВ связного диапазона, а также навигационных электронных систем.

Особенностью конструктивных решений радиоэлектронных Устройств фирмы «Коллинз» последних разработок является, прежде всего, однотипность внешних форм корпусов с широким применением унифицированных заготовок профилей и прокатов для основных деталей конструкции корпусов, несущих шасси и монтажных рам.

На рис. 4.37 приведены блоки авиационной бортовой РЭС фирмы «Коллинз», выполненные в унифицированных корпусах.

На рис 4.38 показано стилевое оформление корпусов блоков навигационной бортовой РЭС фирмы «Кинг».

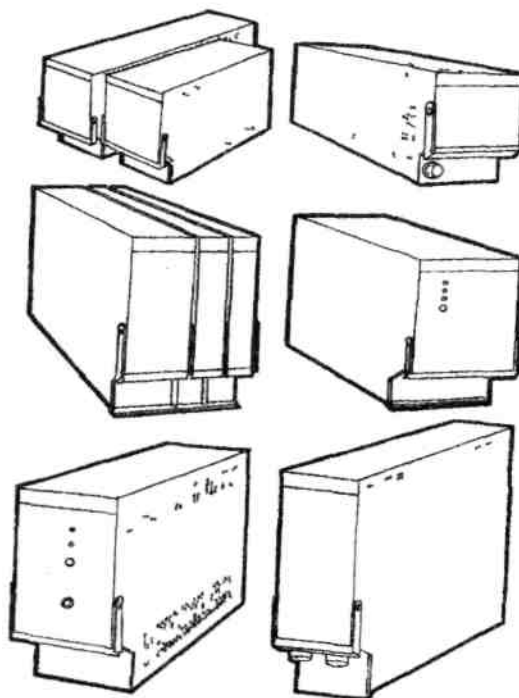


Рис. 4.37.

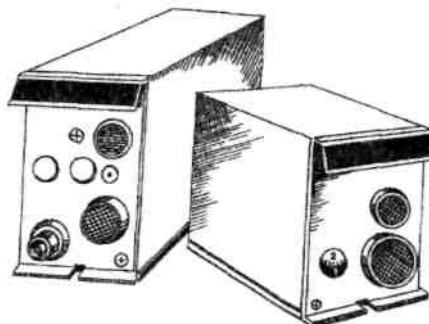


Рис. 4.38.

Как видно из приведенных иллюстраций, существовало и существует достаточное многообразие конструкций корпусов блоков приемов их стиливого оформления применительно для каждой разрабатывающей фирмы.

В России в 60-е годы – начало разработки основополагающей нормативной документации по унификации несущих конструкций блоков авиационной РЭС в отечественной промышленности.

Примеры российских БНК:

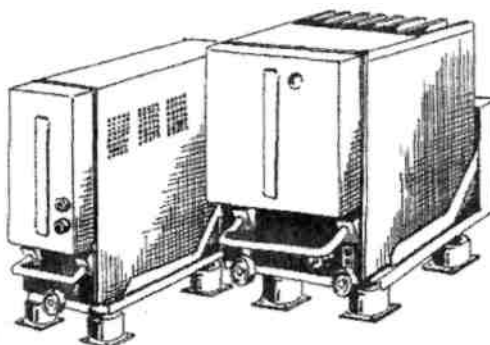


Рис. 4.39.

Рис. 4.39 и рис.4.40 – аппаратура 2-го поколения (радиостанции «Микрон», «Ландыш» и др.).

Рис. .4.41 – аппаратура 3-го поколения (радиостанции «Ядро», «Баклан» и др.).

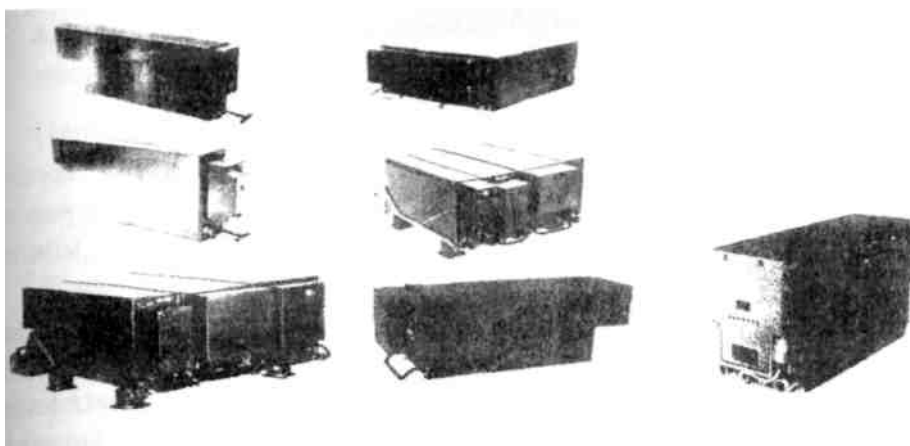


Рис. 4.40.

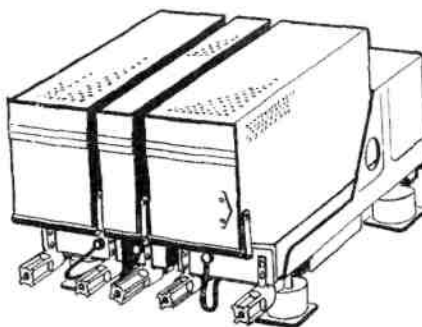


Рис. 4.41.

Как видно из приведенных иллюстраций, стиль конструктивного выполнения изменялся от поколения к поколению, при этом конструкция в пределах поколения выбиралась каждым предприятием-разработчиком в стиле своих установившихся традиций. Таким образом, при обеспечении требований взаимозаменяемости единый конструктив – БНК на этих этапах не был решен.

В основу построения БНК положены ее структурные конструктивные уровни, что обеспечивает модульное построение аппаратуры (рис. 4.42).

1-й конструктивный уровень представляет собой отдельные функциональные ячейки – субблоки 1, которые составляют основное содержание блоков. Блоки 2 относятся к структуре 2-го уровня. Монтажные устройства представляют собой 3-й структурный уровень и могут быть выполнены в виде одиночной монтажной рамы 3, групповой – 4 и стеллажа – 5. При этом монтажные устройства могут иметь амортизированное исполнение (за счет их установки на амортизаторы) и неамортизированное.

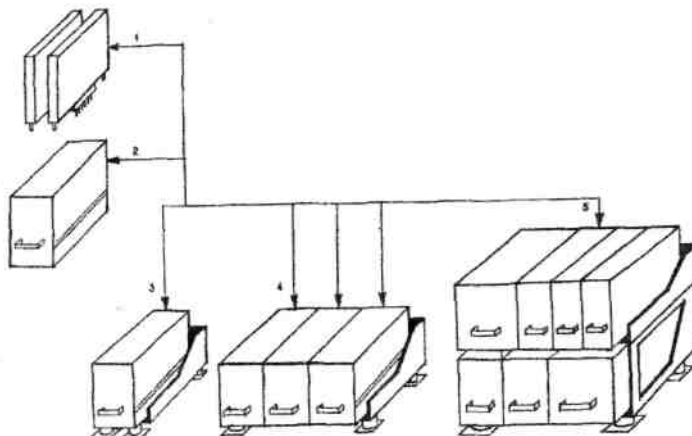


Рис. 4.42.

В соответствии с изложенным БНК1 представляет собой конструктив (печатная плата или их набор, монтажный корпус и т.п.) субблока, БНК2 – корпус блока прямоугольной формы, предназначенный для размещения основных частей радиоэлектронного средства с установленными на нем элементами сопряжения с монтажным устройством, БНК3 – монтажное устройство, на которое устанавливают БНК2 и которое обеспечивает с ней (с ними) механическое, электрическое и воздушное сопряжения.

На рис. 4.43 показана форма и габаритные размеры, а в табл. 4.3 приведены типоразмеры корпусов блоков.

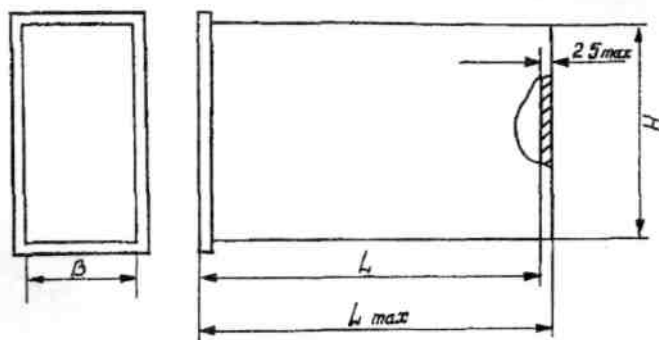


Рис. 4.43.

Примеры конструирования блоков на основе базовых несущих конструкций

Необходимо заметить, что на протяжении ряда лет параметрический типоразмерный ряд, приведенный выше в табл. 4.3, несколько расширился, добавлялся или ограничивался.

В настоящее время имеется тенденция принять тип корпуса К (как имеющий наибольшее распространение) за основной и только его разрешить для общего применения, одновременно дополнив его типоразмерами 0,5К, 3,5К, 4,5К, и 5,5К, имеющими соответственно размеры по ширине 25,4; 223,3; 289,3; 355,3 мм.

На рис. 4.44 показан принцип построения типоразмерного ряда корпусов блоков.

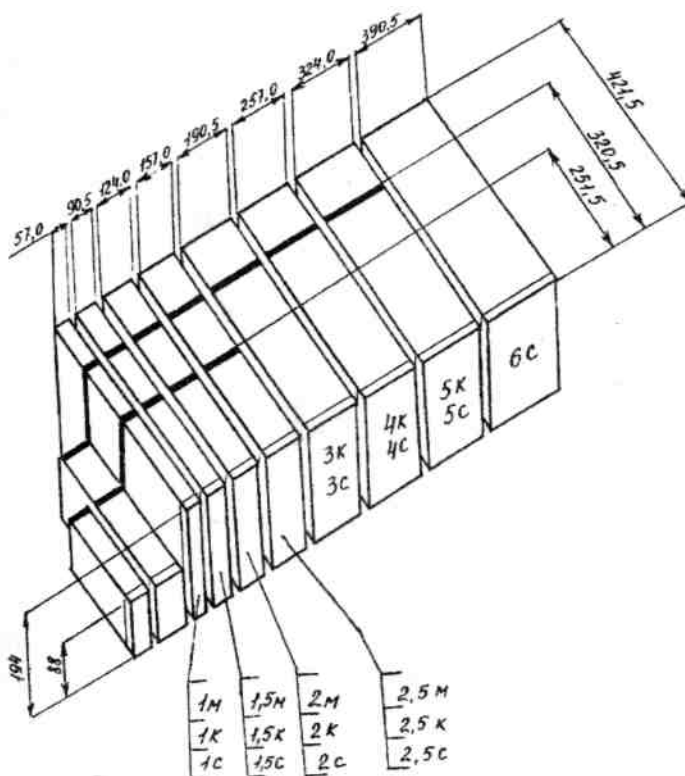


Рис. 4.44.

Следует пояснить причину наличия дробных размеров в типоразмерном ряду корпусов блоков. Во-первых, приведенные размеры в миллиметрах по метрической системе получены в результате пересчета из дюймовых размеров, по которым построен типоразмерный ряд АРИНК, и, во-вторых, исходя из условия, что последующие размеры ширины корпуса получаются в результате сумм предыдущих с суммой зазоров между корпусами по 10 мм. Итак, например, размер корпуса по ширине 124 мм получается в сумме $57 + 57 + 10$, размер 157 мм - представляет сумму $57 + 90 + 10$ и т.д. Такое размерное построение дает возможность выполнять одинаковые по ширине группы блоков, а следовательно, и одинаковые по ширине монтажные рамы.

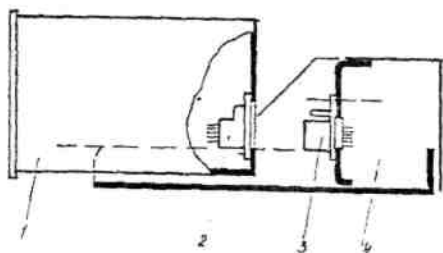


Рис. 4.45

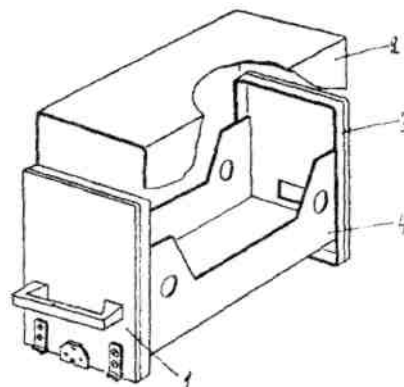


Рис. 4.46

Для электрического соединения БНК2 и БНК3 на них устанавливаются электросоединители врубного типа соответственно на задней панели корпуса блока и на опорной панели монтажной рамы (рис. 4.45), где 1 – блок (БНК2); 2 – блочная часть электрического соединителя; 3 – кабельная часть электрического соединителя; 4 – монтажная рама (БНК3).

Базовую несущую конструкцию (рис. 4.46) составляет совокупность ее основных элементов: передняя панель 1, кожух 2, задняя панель 3, шасси 4.

Базовая конструкция корпусов блоков неэкранированного и экранированного исполнения определена несколькими видами:

вид 1 – неэкранированная БНК2 со съёмными Г-образными крышками (рис. 4.47, 4.48 (рис. 4.47: 1 – передняя панель; 2 – верхняя планка; 5 – Г-образная крышка; 4 – задняя панель; 5 – дно.);

вид 2 – неэкранированная БНК2 со съёмными верхней крышкой, дном и боковыми стенками (рис. 4.49: 1 – передняя панель; 2 – стенка боковая; 3 – крышка верхняя; 4 – задняя панель; 5 – дно);

вид 3 – экранированная БНК2 со съёмными П-образными верхним и нижним кожухами (рис. 4.50: 1 – боковая накладка; 2 – нижняя П-образная крышка; 3 – передняя панель; 4 – верхняя П-образная крышка; 5 – задняя панель; 6 – шасси),

вид 4 – неэкранированная БНК2 с общим кожухом и съёмной передней панелью (рис. 4.51: 1 – общий кожух; 2 – съёмная передняя панель).

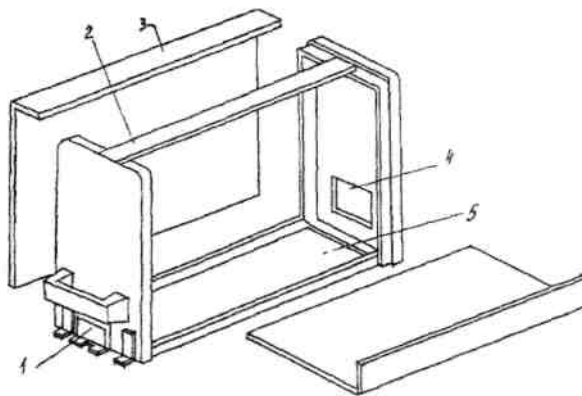


Рис. 4.47.

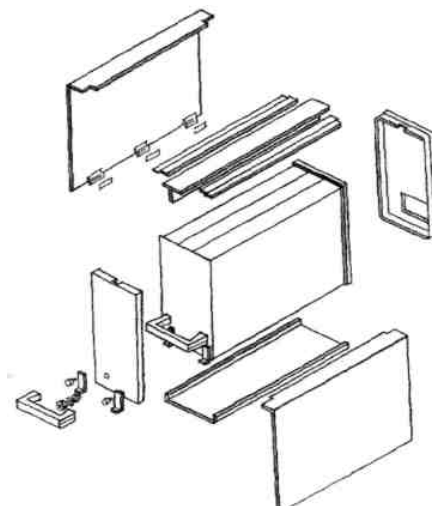


Рис. 4.48.

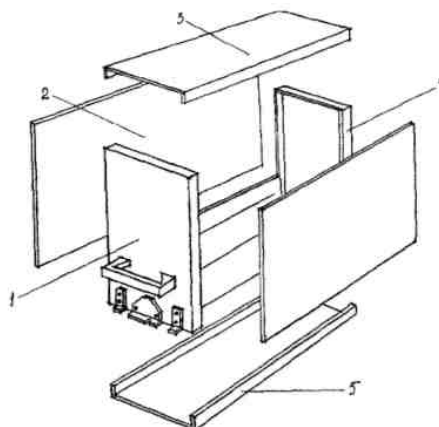


Рис. 4.49.

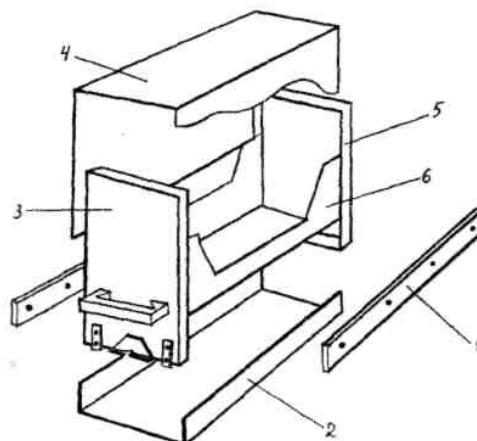


Рис. 4.50.

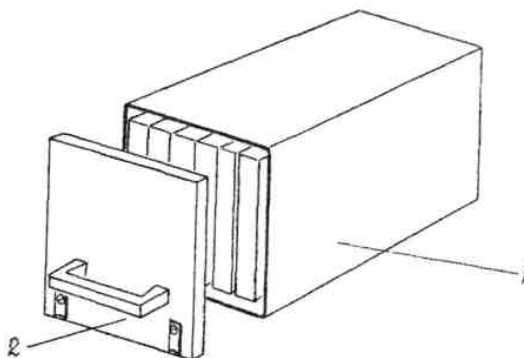


Рис. 4.51.

Виды корпусов с многофункциональным электрическим соединителем обозначают добавлением буквы А к номеру вида (1А, 2А, 3А, 4А).

Для крепления корпусов блоков на монтажных устройствах предусматриваются зажимные устройства, фиксаторы, съемники различного исполнения в зависимости от требований, определяющих быстросъемность и жесткость крепления, выполняемые в БНК.

В БНК различных видов могут компоноваться блоки РЭС различного функционального назначения.

На рис. 4.52 показано изделие РЭС, выполненное в БНК.

Стандартизация на основе БНК обеспечивает:

для разработчиков и предприятий-изготовителей аппаратуры:

- сокращение номенклатуры выпускаемых изделий;
- возможность организации крупносерийного специализированного производства БНК и их элементов;
- сокращение себестоимости производства за счет стандартизации;
- разработку аппаратуры независимо от разработки самолета;
- возможность создания конкурентоспособности на международных рынках аппаратуры;

для разработчиков самолетов:

- разработку самолета независимо от разработки аппаратуры;
- рациональное размещение оборудования на монтажных устройствах;
- оптимизацию использования пространства технических отсеков;
- инициативу комплексирования борта в целом;
- снижение массы;
- упрощение монтажа аппаратуры на борту самолета

для эксплуатирующих организаций;

- сокращение времени на проведение всех видов регламентных работ;
- сокращение номенклатуры находящейся в эксплуатации и хранящейся на складах аппаратуры;
- сокращение используемой контрольной аппаратуры и оборудования;
- повышение регулярности вылетов;
- разгрузку летно-технического состава;

- сокращение времени на подготовку и переподготовку летного и технического персонала;
- исключение случаев ошибочной установки блоков аппаратуры на монтажные устройства.

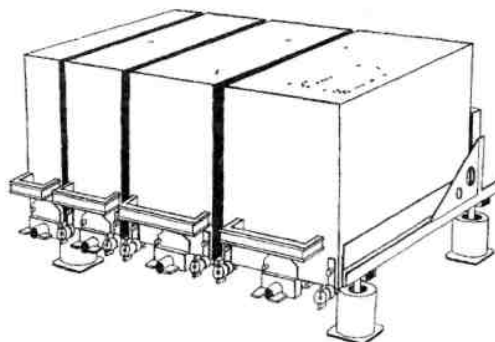


Рис. 4.52.

Элементы электрических соединений в ФЯ и блоках. Технология выполнения электрических соединений межъячеечного и межблочного монтажа РЭС.

Под электрическими соединениями понимают **линии передачи (ЛП)** и электрические контакты, служащие для передачи сигналов и электрической энергии между МС, ЭРЭ, модулями, образующими ЭА.

По выполняемым функциям различают **сигнальные ЛП**, объединяющие входы и выходы элементов и модулей и предназначенные для передачи сигналов, и **электропитания**, осуществляющие подвод электрической энергии к элементам. В том и другом случае ЛП имеют обратный провод, называемый **землей (линией нулевого потенциала, общим проводом)**, по которому протекают возвратные токи сигнальных линий и линий электропитания.

В зависимости от конструктивных особенностей обратного провода ЛП подразделяют на:

- симметричные, состоящие из двух одинаковых изолированных проводов;
- несимметричные с одним общим проводом для многих ЛП;
- коаксиальные, представляющие собой два разных по конструкции цилиндрических проводника с совмещенными осями (обратный провод есть оплетка коаксиального кабеля).

Выделяют **неэкранированные** и **экранированные ЛП**. Экраны последних обеспечивают защиту линий от воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей.

Электрические соединения бывают внутри- и межмодульными, внутри- и межъячеечными, внутри- и межблочными и т.п., что обуславливает их конструктивное исполнение.

Линии передачи должны обладать:

- минимальным активным и индуктивным сопротивлениями;
- однородным по длине линии волновым сопротивлением;
- минимальным полем вокруг линии при протекании по ней тока;
- способностью передавать электрические сигналы в широком диапазоне частот, токов и напряжений;

- минимальной толщиной изоляционного слоя провода с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице;
- способностью к объединению в узлы;
- возможностью осуществлять коммутацию без механической поддержки;
- способностью к автоматизации при проведении монтажных работ.

Удовлетворить вышеперечисленным требованиям, используя какой-либо один тип ЛП, не представляется возможным. Поэтому в реальных конструкциях применяют разнообразные типы ЛП в зависимости от функциональных особенностей как ЛП, так и аппаратуры.

На выбор типа ЛП влияют форма передаваемых сигналов, их напряжение и частота, ослабление сигнала на единицу длины линии, механическая гибкость, технологические требования и некоторые другие факторы.

Радиоэлектронные и вычислительные средства содержат разнообразные по выполняемым функциям элементы и модули, отличающиеся характером обрабатываемых сигналов, их мощностью, частотой и пр. При передаче электрических сигналов по ЛП происходит искажение формы и спектра сигналов, их затухание. Искажение сигнала определяется степенью рассогласования параметров электронных схем с параметрами ЛП, взаимным влиянием расположенных по соседству ЛП, задержкой сигналов из-за конечного времени прохождения сигналов по ЛП. Линии передачи ограничивают мощность, передаваемую от источника электроэнергии, и рассеивают в окружающее пространство электромагнитную энергию.

Выбор конструктивно-технологического варианта исполнения электрических соединений — важная и сложная задача, в значительной степени влияющая на качество проектируемой ЭА.

Электрический сигнал передается по проводнику тока, которым является металлическая проволока (провод), пленочные и печатные проводники. В поперечном сечении провода бывают круглыми или прямоугольными, пленочные и печатные проводники — только прямоугольными. Провода защищаются изолирующими диэлектрическими оболочками, либо оболочками и экранами. По *волноводам* и *волоконно-оптическим ЛП* передается электромагнитная энергия радиочастотного (волновод) и светового (световод) диапазонов.

На рис. 63 приведены виды ЛП и конструктивные особенности их исполнения, если читать рисунок из любого места по направлениям стрелок. Например, существует конструктивное исполнение ЛП в виде прямоугольного неизолированного провода или многожильного круглого изолированного провода.

Для повышения производительности труда при сборке ЭА, упрощения электромонтажных работ ЛП объединяют конструктивно-технологически в узлы (рис. 64), состоящие, например, в жгутах из нескольких десятков линий. Чтение рисунка из любого места по направлениям стрелок позволяет получить название узла объединения. Например, опрессованный плоский кабель или печатный узел объединения.

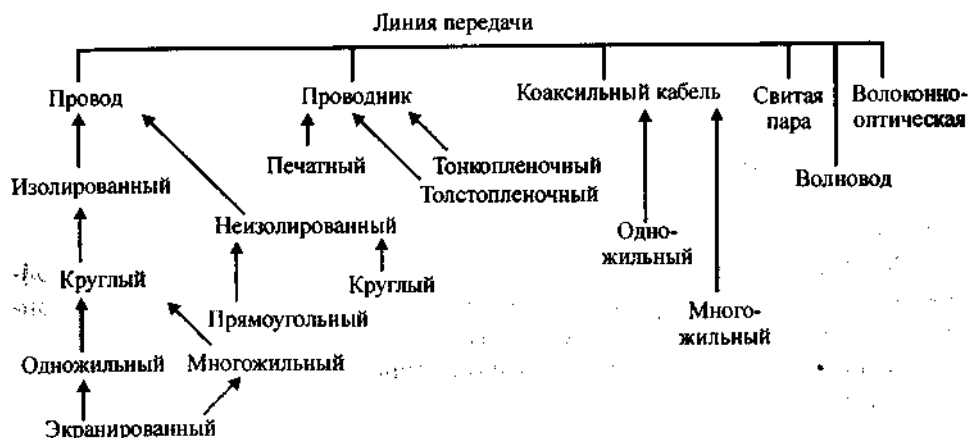


Рис. 63. Виды и конструктивные особенности линий передач

Линии электропитания представляют собой объемные провода, пленочные и печатные проводники, либо проводящие пластины. Конструктивное исполнение сигнальных ЛП более разнообразно и во многом определяется частотным диапазоном передаваемых сигналов. Лишь оценив характер искажения сигналов в ЛП, можно правильно ее применить.

Все сигнальные линии связи разделяют на *электрически длинные* и *электрически короткие*, характер искажения сигналов в которых различен.

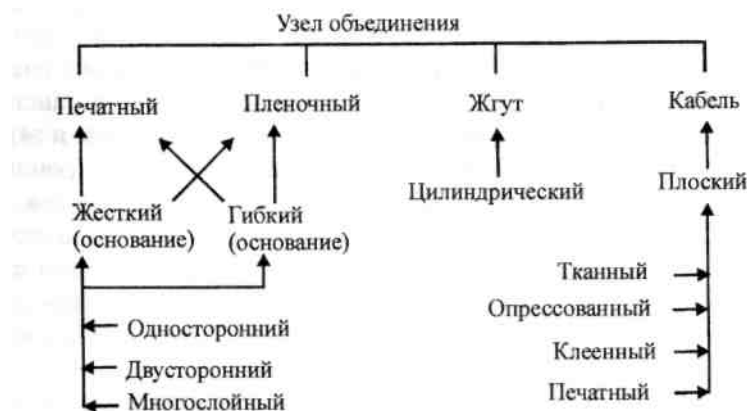


Рис. 64. Конструктивно-технологическое объединение линий передач

Электрически короткой (далее *короткой*) называют ЛП, длина которой l_k для гармонического сигнала определяется по выражению:

$$l_k \leq 0,1\lambda \leq c/(\sqrt{\epsilon} f)$$

$$l_k \leq 0,25\bar{l}_{кр},$$

где λ , f – длина волны и частота сигнала; c – скорость света; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, окружающей линию передачи.

Электрически длинной – длина которой больше или равна критической:

$$l_{dl} \geq \bar{l}_{кр}$$

При разложении импульсного сигнала в спектр в нем следует выделить гармонику наибольшей частоты и для нее определить длину короткой линии (верхней предел частоты ориентировочно можно найти по формуле $f = 0,4/t_\phi$, где t_ϕ – минимальное значение фронта импульсного сигнала на уровне 0,1 и 0,9 амплитудного значения сигнала).

Длинную или короткую ЛП можно установить из соотношения фронта передаваемого импульса t_ϕ и времени задержки прохождения сигнала по линии t_3 . Если имеет место

неравенство $t_{\phi}/t_3 \geq 2$, то ЛП электрически короткая, если же сохраняется соотношение $t_{\phi}/t_3 < 2$, то – электрически длинная.

Тема 5. ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ РЭС ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

(8 ч. ЛК, 4 ч. СРС)

Виды механических воздействий и характер влияния на конструкцию РЭС.

В процессе эксплуатации РЭС подвергаются механическим воздействиям. Характер и интенсивность воздействий зависят от вида источников воздействия и их расположения относительно элементов конструкции РЭС. Наиболее часто источниками механических воздействий являются: окружающая среда, силовые установки объекта, электромеханические устройства с неуравновешенными вращающимися роторами и т.д. К механическим воздействиям относятся: линейные перегрузки, вибрации и удары, непосредственное воздействие возмущающей силы на РЭС (или на какой-либо элемент его конструкции) принято называть силовым возбуждением. В случае, когда заданы законы движения удельных точек системы (например, закон движения основания), силовое возбуждение называют кинематическим.

Все объекты, движущиеся с переменной скоростью, имеют линейное ускорение. Линейное ускорение деталей и электрорадиоэлементов конструкций РЭС обусловлено силами инерции, которые могут во много раз превышать силы тяжести. Так, если на элемент с массой m в состоянии покоя действует сила тяжести $G = mg$, то при движении с ускорением $a(t)$ тот же элемент дополнительно подвергается воздействию силы инерции $P_u = m a(t)$. Тогда результирующая сила, действующая на элемент $\vec{P}_p = \vec{P}_u + \vec{G}$, а результирующее ускорение $a^p_p = g^p_p + a^p(t)$.

При движении объекта по криволинейной траектории, например, по дуге окружности с радиусом R , элементы конструкции РЭС будут иметь центробежное ускорение $a = mV^2/R$, где V – линейная скорость движения объекта.

Отношение действующего ускорения к ускорению свободного падения называют перегрузкой. Линейные перегрузки, за исключением кратковременных, не могут быть устранены или ослаблены. Поэтому работоспособность конструкций может быть обеспечена за счет повышения жесткости и прочности элементов, что ведет к увеличению массы конструкций РЭС.

Под вибрацией РЭС понимают механические колебания конструкции в целом или её элементов. Вибрация может быть **периодической** или **случайной**. В свою очередь периодическая вибрация подразделяется на гармоническую и полигармоническую, а случайная – на стационарную, нестационарную, узкополосную и широкополосную. Гармоническая вибрация в реальных условиях встречается редко, но широко используется при лабораторных испытаниях конструкций РЭС, теоретическом анализе вибраций, а также при определении динамических характеристик конструкций.

Вибрацию принято характеризовать **виброперемещением, виброскоростью и виброускорением**.

Виброперемещение при гармонической вибрации определяется как:

$$z(t) = Z \sin \omega t, \quad (5.1)$$

где Z – амплитуда виброперемещения; ω – частота вибраций.

Виброскорость и виброускорение находят в результате дифференцирования (5.1):

$$v(t) = \dot{z}(t) = \omega Z \cos \omega t; \quad (5.2)$$

$$a(t) = \ddot{z}(t) = -\omega^2 Z \sin \omega t \quad (5.3)$$

Виброускорение при гармонической вибрации опережает по фазе виброперемещение на угол π , виброскорость – на угол $\pi/2$.

Амплитуды виброперемещения Z , виброскорости ωZ , виброускорения $\omega^2 Z$ и угловая частота колебаний являются основными характеристиками гармонической вибрации. Однако, кроме них гармоническую вибрацию можно характеризовать вибрационной перегрузкой:

$$n_B = \frac{|a|}{g} = \frac{\omega^2 Z}{g} \quad (5.4)$$

Если в (5.4) амплитуда виброперемещения выражена в мм, а ускорение силы тяжести в мм/с, то соотношение для вибрационной перегрузки можно записать в виде

$$n_g = Z f^2 / 250 \quad (5.5)$$

где f – круговая частота вибраций.

Полигармоническая, или сложная периодическая, вибрация может быть представлена в виде суммы гармонических составляющих.

Для **случайной вибрации** характерно то, что ее параметры (амплитуда виброперемещения, частота и др.) изменяются во времени случайно. Она **может быть стационарной и нестационарной**. В случае случайной стационарной вибрации математическое ожидание виброперемещения равно нулю, математические ожидания виброскорости и виброускорения постоянны. В случае нестационарных вибраций статистические характеристики не постоянны.

Кроме вибрации, аппаратура может подвергаться **ударным воздействиям**, возникающим при эксплуатации, транспортировке, монтаже и т.д. При ударе элементы конструкции испытывают нагрузки в течение малого промежутка времени τ , ускорения достигают больших значений и могут привести к повреждениям элементов. Интенсивность ударного воздействия зависит от формы, амплитуды и длительности ударного импульса.

Форма ударного импульса определяется зависимостью ударного ускорения a от времени. При анализе ударных воздействий реальную форму ударного импульса заменяют более простой, например прямоугольной, треугольной, полусинусоидальной. За амплитуду ударного импульса принимают максимальное ускорение при ударе. Длительностью удара τ называют интервал времени, в течение которого действует ударный импульс. Последствием удара являются возникающие в элементах конструкции затухающие колебания. Поэтому на практике возникает необходимость в защите конструкций бортовой РЭС одновременно от ударов и вибраций. Правомочность такой постановки вопроса обусловлена тем, что в реальных условиях эксплуатации конструкции могут подвергаться комплексным механическим воздействиям, что должно найти отражение при конструировании средств защиты. Приближенные значения отдельных видов механических воздействий на РЭС, эксплуатируемых на подвижных объектах, приведены в табл. 5.1.

В результате механических воздействий в элементах конструкций РЭС могут происходить обратимые и необратимые изменения. Обратимые изменения характерны для электрорадиоэлементов и приводят к нарушению устойчивости и ухудшению качества функционирования аппаратуры. В зависимости от физики

протекающих в конструкции процессов факторы, вызывающие обратимые изменения, можно объединить в следующие группы:

- деформации в активных и пассивных элементах, приводящие к изменению их параметров (конденсаторы, катушки индуктивности, пьезоэлектрические кварцевые резонаторы, электровакуумные приборы и др.);
- нарушение электрических контактов в разъемах и неразъемных соединениях, вызывающее изменение омического сопротивления контактов;
- изменение параметров электрических, магнитных и электромагнитных полей, которое может привести к нарушению условий электромагнитной совместимости в конструкции.

Таблица 5.1.

Название группы РЭС	Уровни механических воздействий						
	Вибрации		Удары			Акустический шум	Линейные перегрузки
	частота	ускорение	ускорение	длительность	частота		
	<i>Гц</i>	<i>м/с²</i>	<i>м/с²</i>	<i>мс</i>	<i>мин⁻¹</i>	<i>ДБ</i>	<i>м/с²</i>
Возимые на транспорте: автомобильном гусеничном, железнодорожном	1...500	50	147	5...10	40...80	135	
	1...500	50...100	147	5...10	40...80	135	
	2...100	19,6	392	3...10	40...80	125	
Судовые: большие суда малые суда	1...500	20...50	147	5...15	40...80	140	50
	1...500	20...50	147	5...15	40...80	140	50
Носимые и портативные на открытом воздухе	10...70	37	98	5...10	40...80	85	
Носимые и портативные в отапливаемом помещении	10...30	10.7	98	5...10	40...80	85	
Самолетные	5...2000	1...196	49...150	5...15		150	49...98
Ракетные	0...50	196,2	60...981	1...15		170	196
Космические	1...200	98	50	2...10		150	150
Вертолётные	1...500	2...50	49...150	5...15		150	50...98

Необратимые изменения свойственны конструктивным элементам РЭС, связаны с нарушением условий прочности и проявляются в механических разрушениях элементов. Разрушениям под влиянием механических воздействий наиболее подвержены элементы, предварительно нагруженные при их монтаже. Такими элементами являются болты, винты, заклепки в предварительно напряженном (затянута) соединении. Если запас прочности такой детали недостаточно велик, то при дополнительных нагрузках в результате механических воздействий может произойти ее разрушение. Нередки случаи разрушения сварных швов, в которых имеют место остаточные термические напряжения, обрывы объемных проводников, соединяющих радиоэлементы, если при выполнении монтажа проводники получили излишнее натяжение.

К необратимым изменениям, происходящим в конструктивных элементах РЭС при механических воздействиях, относятся усталостные разрушения.

Усталостью называется процесс постепенного накопления повреждений в материале детали под действием переменных напряжений. Механизм этого процесса связан со структурной неоднородностью материала (отдельные зерна неодинаковы по форме и

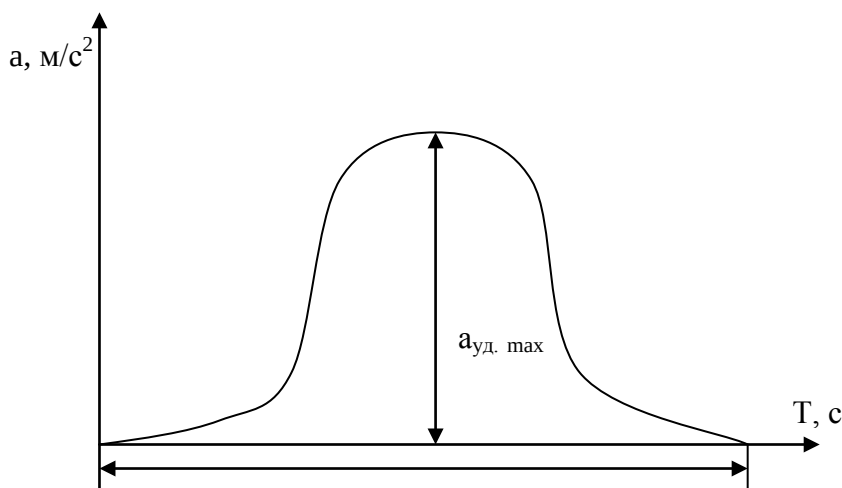
размерам, по-разному ориентированы в пространстве, имеют включения, структурные дефекты). В результате этой неоднородности в отдельных неблагоприятно ориентированных зернах (кристаллитах) при переменных напряжениях возникают сдвиги, границы которых со временем расширяются, переходят на другие зерна и, охватывая все более широкую область, развиваются в усталостную трещину. Усталостная прочность материалов зависит от величины и характера изменения напряжений, от числа циклов нагружения.

Конструкции РЭС, работающие в условиях механических воздействий, должны отвечать требованиям прочности и устойчивости. Согласно ГОСТ 16962-71 под прочностью (вибро- и ударпрочностью) к воздействию механических факторов подразумевается способность конструкций выполнять функции и сохранять значения параметров в пределах норм, установленных стандартами, после воздействия механических факторов.

Под **устойчивостью (вибро- и удароустойчивостью)** к воздействию механических факторов понимают способность конструкции выполнять заданные функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных стандартами, во время воздействия механических факторов.

Вибро- и ударпрочность, виброустойчивость. Критерии вибропрочности конструкции.

#Удар – кратковременное воздействие, в результате которого элементы изделия получают большие ускорения ($\Rightarrow$ перегрузки).

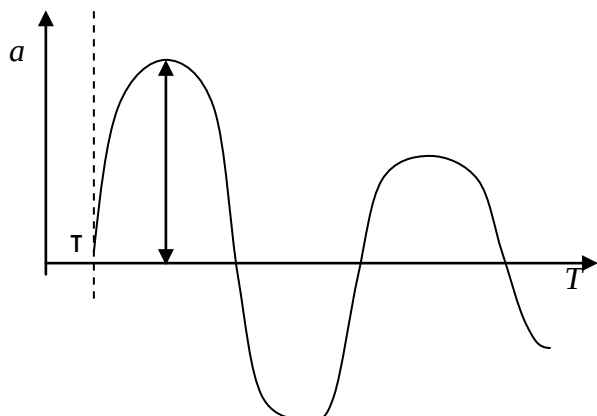


$\tau = 2..15$ мс – длительность

$\frac{1}{\tau}$ – условная частота возбуждения при ударе.

При ударе возникает прогиб материала, например при синусоидальном ударном импульсе:





Колебательный процесс на частоте свободных колебаний.

Анализ сводится к определению максимального статического прогиба, напряжению материала при данном прогибе и сравнению последнего с допустимым напряжением для этого материала.

Расчетные модели для оценки вибропрочности радиоэлементов и элементов конструкции РЭС. Основы расчета частот механического резонанса и вибропрочности конструкций РЭС.

Исходя из определения вибропрочности и анализа динамических процессов, протекающих в элементах конструкций РЭС при вибрациях, можно определить следующие условия обеспечения вибропрочности:

- отсутствие в конструкции механических резонансов;
- ограничение амплитуды виброперемещения и виброскорости значениями, исключающими опасные напряжения и усталостные явления в элементах конструкции;
- допустимые значения виброперегрузок в диапазоне частот внешних воздействий должны превышать величины, определенные техническим заданием на разработку конструкции РЭС.

Первое условие выполняется, если частота свободных колебаний элементов конструкции лежит за пределами диапазона частот внешних воздействий. Ввиду того, что частота свободных колебаний $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, где k – жесткость элемента конструкции; m – масса, для снижения массы конструкции приемлемым является решение: $\omega_0 > \omega_{\text{в}}$, где $\omega_{\text{в}}$ – верхняя граница диапазона частот внешних воздействий.

Проверка выполнения условия прочности конструкции при вибрации производится на основе приведения динамической задачи к статической. Для этого необходимо найти коэффициент динамичности конструкции μ и нагрузку, которая возникает в элементах конструкции:

$$P = m g \mu n_e,$$

где m – масса элемента конструкции; g – ускорение свободного падения; n_e – вибрационная перегрузка элемента при резонансе. Затем по формулам сопротивления материалов следует определить допустимое напряжение, которое может выдержать элемент в течение заданного срока эксплуатации:

$$\sigma_{\text{дон}} = \sigma / n \quad (5.15)$$

где σ – предельное значение напряжения (предел прочности) для материала; n – запас прочности.

Запас прочности обычно устанавливают на основе так называемого дифференциального метода в виде произведения частных коэффициентов: $n = n_1 n_2 n_3$, где $n_1 = 1,2...1,5$ – коэффициент достоверности определения расчетных нагрузок и напряжений; $n_2 = 1,0...1,5$

– коэффициент, учитывающий степень ответственности детали; $n_3 = 1,2...3$ – коэффициент, учитывающий однородность механических свойств материалов.

В случае изгибных деформаций напряжение на изгиб:

$$\sigma_u = M_u / W_u \leq \sigma_{u.\partial on} \quad (5.16)$$

где M_u – изгибающий момент в наиболее опасном сечении элемента конструкции; W_u – момент сопротивления при изгибе.

Усталостные разрушения характерны для циклических нагрузок на высоких частотах вибраций и обычно наблюдаются при резонансных колебаниях радиоэлементов. Чаще всего разрушаются выводы радиоэлементов, т.к. механические напряжения в определенных сечениях выводов (область изгиба и соединения с контактными площадками коммутационных плат) при вибрациях на резонансной частоте резко возрастают. Если известно максимальное циклическое напряжение в выводах, то по кривой усталости для материала можно определить число циклов до разрушения, таким образом, составить прогноз долговечности изделия. Количественной оценкой долговечности служит время работы элемента до разрушения выводов

$$t_p = N_p / f_{01} \quad (5.17)$$

где N_p – число циклов нагрузки до разрушения; f_{01} – частота свободных колебаний основного тона элемента.

Связь между виброперегрузкой n_e , частотой ω и амплитудой вибраций Z , определяется выражением (5.18). Если, исходя из допустимых напряжений, возникающих в материале элемента конструкции, положить ограничение на амплитуду вибраций, то получим предельное значение виброперегрузки:

$$n_{e.\partial on} \leq \frac{\omega^2 Z_{\partial on}}{g} \quad (5.18)$$

Выразив виброперегрузку через виброскорость v , можно найти допустимое значение виброперегрузки при ограничении на виброскорость:

$$n_{e.\partial on} \leq \frac{\omega v_{\partial on}}{g} \quad (5.19)$$

Таким образом, количественной оценкой вибропрочности конструкции служат частота собственных, механических колебаний элементов конструкции f_0 и величина допустимой внешней перегрузки $n_{\partial on}$ на частоте вынужденных колебаний при ограничениях на амплитуду колебаний Z и виброскорость V . Необходимым условием обеспечения вибропрочности является превышение допустимого значения перегрузки над величиной n_{T3} , устанавливаемой ТЗ, которая, в свою очередь, зависит от объекта установки РЭС. Условие обеспечения вибропрочности конструкций бортовой РЭС на резонансной частоте можно представить следующим образом:

$$n_z = \frac{(2\pi f_0)^2 Z_{\partial on}}{\mu g} \quad (5.20)$$

$$n_v = \frac{2\pi f_0 V_{\partial on}}{\mu g} \quad (5.21)$$

$$n_{\partial on} = \min\{n_v, n_z\} \geq n_{T3} \quad (5.22)$$

где μ – коэффициент динамичности, показывающий превышение амплитуды колебаний элементов конструкции РЭС относительно их статического прогиба. Для простейших конструкций $\mu = \pi / \delta$, δ – логарифмический декремент затухания материала элемента конструкции. Для конструкций сложной формы аналитически затруднительно определить значение μ , поэтому его определяют экспериментально. Так, например, для микросборок $\mu = 25-40$, для функциональных ячеек (ФЯ) на печатных платах $\mu = 5-10$.

Из выражений (5.20) и (5.21) следует, что проверка условия вибропрочности конструкции сводится к определению частот собственных механических колебаний функциональных ячеек f_0 и допустимых значений перегрузок n_z и n_y , причем для заданного типа конструкции (μ – постоянная величина) увеличение $n_{дон}$ может быть обеспечено за счет увеличения резонансной частоты f_0 .

Для расчета частоты собственных колебаний различных конструкций ФЯ, исходят из представления ФЯ в виде тонкой нагруженной пластины. Тонкой считается пластина, если отношение её меньшей стороны к толщине не менее 10. Собственная частота тонкой пластины (Γ_4) из однородного упругого материала определяется по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m_0}} \quad (5.23)$$

где a – длина пластины, м; λ – коэффициент, зависящий от способа закрепления пластины и отношения её сторон; D – цилиндрическая жесткость пластины, $H \cdot m$,

Собственная частота конструкции ФЯ в виде ПП с установленными на ней микросхемами и другими электрорадиоэлементами находится по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{a^2} K_{эpz} \sqrt{\frac{D_{nl}}{m_0}} \quad (5.24)$$

где λ – коэффициент, определяемый способом закрепления; D_{nl} – жесткость ПП (пластины), $H \cdot m$;

$m_0 = \rho_{nl} \cdot h$ – распределенная масса платы (масса единицы поверхности), $кг/м^2$, ρ_{nl} – плотность материала ПП, $кг/м^3$;

$$D_{nl} = \frac{E_{nl} h^3}{12(1 - \varepsilon_{nl}^2)} \quad (5.25)$$

где h – толщина пластины; E_{nl} – модуль упругости материала платы, $H/м^2$; ε_{nl} – коэффициент Пуассона материала ПП; $K_{эpz}$ – коэффициент, учитывающий массу установленных на плату ЭРЭ:

$$K_{эpz} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_{эpz}}{m_{nl}}}} \quad (5.26)$$

$m_{эpz}$ – масса ЭРЭ, установленных на плату, $кг$; m_{nl} – масса ПП, $кг$; $m_{nl} = \rho_{nl} \cdot a \cdot b \cdot h$; b – ширина платы, $м$.

Значения E , ε , ρ являются табличными значениями материала ПП. Коэффициент (λ), зависящий от формы и способа закрепления пластины, определяется следующим образом:

$$\lambda = K \sqrt{1 + \beta_1 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + \beta_2 \left(\frac{a}{b}\right)^4} \quad (5.27)$$

где K , β_1 , β_2 – эмпирические коэффициенты, значения которых, в зависимости от способа закрепления, определяются по таблице. 5.2.

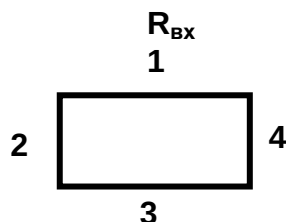


Рис. 5.1. Схема обозначения сторон ПП.

1 – верхняя сторона платы, 3 – нижняя сторона платы 2,4 – боковые стороны платы

Таблица 5.2.

№ варианта	Способы закрепления сторон платы				Значение коэффициента		
	1	2	3	4	K	β_1	β_2
1	O*	O	O	O	9,87	2	1
2	3*	O	O	O	9,87	2,33	2,44
3	3	O	3	O	9,87	2,57	5,14
4	3	3	3	3	22,37	0,61	1
5	3	3	3	C*	3,52	5,97	40,5
6	c	3	C	3	22,37	0	0
7	c	O	C	3	15,42	0	0
8	o	C	O	3	9,87	0,6	1,26
9	В 4-х точках по углам				9,87	2	1

C* – сторона свободна (не закреплена),

O* – сторона опорта (закреплена не жестко),

3* - заземлена (закреплена не жестко)

Приведённые соотношения позволяют оценить вибропрочность конструкции.

Конструктивные способы защиты РЭС от механических воздействий.

Виброизоляция. Эффективность виброизоляции.

#Виброизоляция – применение конструктивных элементов, которые изменяют параметры внешнего воздействия на ИВТ.

Таковыми элементами являются виброизоляторы – (амортизаторы).

Конструктивно амортизатор представляет собой узел, в котором объединены упругий элемент (цилиндрическая или коническая стальная пружина) и демпфирующий (вносящий затухание) элемент.

Затухание в амортизаторе обеспечивается за счет трения перемещающихся частей (фрикционное демпфирование) или за счет вытеснения воздуха из одной камеры в другую камеру амортизатора (воздушное демпфирование).

В простейших амортизаторах функции упругого и демпфирующего элемента объединены. Затухание вносится за счет внутреннего трения при деформации материала.

Параметры амортизаторов.

P_H – номинальная нагрузка на амортизатор [Н];

K_a – жесткость амортизатора;

z_{cm} – статический прогиб амортизатора при номинальной нагрузке.

$$Z_{cm} = \frac{P_H}{K_a}.$$

Частота свободных колебаний при номинальной нагрузке:

$$f_0 = \sqrt{\frac{K_a}{m}} \quad m = \frac{P_H}{g}$$

Амортизаторы делят на:

1. НЧ (3-4Гц)
2. Ср. Ч (8-10 Гц)
3. ВЧ (20-25Гц)

Условия применения амортизаторов – факторы внешней среды, при которых эксплуатируются амортизаторы (должны эксплуатироваться при номинальной нагрузке).

$P_a < P_H$, увеличивается надежность (+) и жесткость (-)

$P_a > P_H$, снижается надежность (-), уменьшается частота f_0 (+)

Тема 6. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РЭС

(10 ч. ЛК, 5 ч. СРС)

Тепловые режимы. Основные понятия и определения.

Проблемы обеспечения нормальных тепловых режимов РЭС.

Надежность работы радиоэлектронных средств (РЭС) в значительной мере определяется ее тепловым режимом, так как перегрев отдельных узлов и элементов приводит к нежелательным изменениям параметров аппаратуры, а иногда к нарушению работы изделия в целом. Причины, вызывающие перегрев, связаны как с процессами, протекающими в самой аппаратуре, так и с условиями ее эксплуатации.

Условия эксплуатации, влияющие на тепловой режим РЭС, характеризуются воздействием температур окружающей среды, быстротой изменения этих температур и величиной их перепадов при одновременном изменении значений внешнего атмосферного давления и влажности.

Кроме того, опыт показывает, что электронное оборудование, устанавливаемое на современных самолетах, эксплуатируется, как правило, при повышенных тепловых режимах, обусловленных, помимо внешних условий, высокой энергоемкостью самой аппаратуры, уменьшением ее габаритных размеров и, следовательно, увеличением плотности заполнения объема, времени непрерывной работы РЭС и др.

На тепловой режим РЭС влияют также большая концентрация тепловыделяющих агрегатов и приборов в зонах размещения аппаратуры на борту самолета и возможная близость мощных источников тепла (двигательные установки, турбохолодильники, силовые агрегаты электрооборудования и др.).

Следует особо остановиться на таких факторах, влияющих на тепловой режим РЭС, как аэродинамический нагрев, условия размещения РЭС в герметизированных (негерметизированных) объемах самолета, режимы работы РЭС.

Теплофизический смысл аэродинамического нагрева заключается в том, что происходит затормаживание потока воздуха около определенных поверхностей фюзеляжа, вызывающее процесс адиабатического сжатия и значительный нагрев поверхностей, причем интенсивность нагрева зависит от скорости полета. При скоростях полета менее 0,5 М (скорость 1 М – 1 мах соответствует 1225 км/ч) аэродинамический нагрев незначителен и повышение температуры может не приниматься во внимание. При больших скоростях воздушный поток обладает высокой кинетической энергией, в связи с чем и происходит значительное повышение температуры. На Рис. 6.1 показано размещение ДВС в конусе воздухозаборника реактивного самолета: 1 – блоки радиолокационных станций (РЛС); 2 – воздухозаборник; 3 – конус воздухозаборника; 4, 5 – эпюры температур на конусе и наружной обшивке воздухозаборника. При этом температура растет локально, главным образом на носовой части фюзеляжа, лобовом стекле кабины и особенно на передних кромках крыла и хвостового оперения.

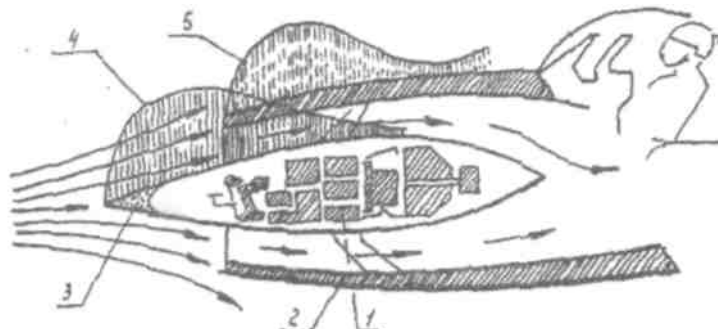


Рис. 6.1.

Тепло, возникающее при аэродинамическом нагреве обшивки самолета, летящего со скоростью нескольких Мах, передается расположенному в отсеках оборудованию и повышает его температуру, а сильно разреженный на большой высоте воздух, несмотря на его низкую температуру для охлаждения аппаратуры оказывается непригодным. Практически при скоростях полета более 0,5 М подсос заборного воздуха в отсек самолета вызывает приток тепла к аппаратуре (рис. 6.2). На рис. 6.2 представлена зависимость притока тепла от подсоса воздуха в отсек при различных скоростях полета.

Зависимость температуры обшивки самолета у поверхности земли и на высотах 11000-25000 м от скорости полета самолета приведена в табл. 6.1.

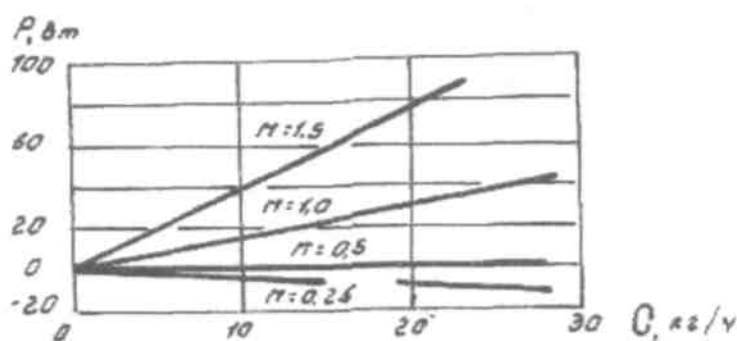


Рис. 6.2.

Таблица 6.1.

Характеристики аэродинамического нагрева, °С	Скорость полета, М					
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	5,0
Повышение температуры обшивки у поверхности земли	58	130	231	360	519	1441

Повышение температуры обшивки на высоте 11000-25000 м	43	97	173	270	389	1083
---	----	----	-----	-----	-----	------

В реальных условиях повышение температуры обшивки самолета при аэродинамическом нагреве (иначе говоря – разница между температурой заторможенного воздуха и окружающей температурой) получается несколько меньше, чем указано в табл.6.1, за счет теплообмена со средой и соседними элементами конструкции посредством излучения и конвекции.

Следует отметить, что полное торможение потока воздуха происходит лишь в так называемых критических точках, расположенных на выступающих частях самолета, где температура участков обшивки современных сверхзвуковых самолетов практически может достигать +250°С и более (в зависимости от режима полета (см. рис. 6.3)).

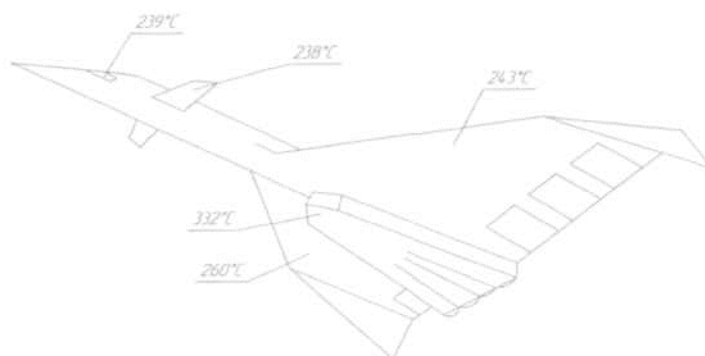


Рис. 6.3. Распределение температур на обшивке самолета ВВС США XB-70A при полете с постоянной скоростью 3200 км/ч

Следующим фактором, влияющим на тепловой режим РЭС, является место ее размещения на борту в герметизированном или негерметизированном объеме самолета.

При размещении аппаратуры в герметизированном объеме она находится в достаточно благоприятных условиях, близких к обычным наземным как по температуре окружающей среды, так и по атмосферному давлению.

Однако при изменении окружающего давления (при наборе самолетом высоты или при его снижении) давление в герметизированном объеме несколько изменяется. Для сохранения скорости и пределов изменения давления применяются различные (в зависимости от типа и назначения самолета) системы регулирования.

Так, в целях более плавного изменения давления воздуха в герметических отсеках скороподъемных самолетов при изменении высоты полета применяется закон регулирования (рис. 5.4), который аналитически выражается уравнением

$$P_K = P_h + (760 - P_h) \cdot I/m,$$

где P_K – давление воздуха в отсеке (салоне), мм рт.ст.;

P_h - давление атмосферного воздуха на высоте h ;

I/m – коэффициент, характеризующий степень наддува отсека:

при $m = 1$ $P_K = P_0 = 760$ мм рт. ст.;

при $m > 1$ $P_K > P_h$;

при $m = \infty$ $P_K = P_h$.

На Рис.6.4 проиллюстрированы законы регулирования давления воздуха P в зависимости от высоты h в герметизированных объемах современных самолетов: 1- военный самолет, 2 - пассажирский самолет.

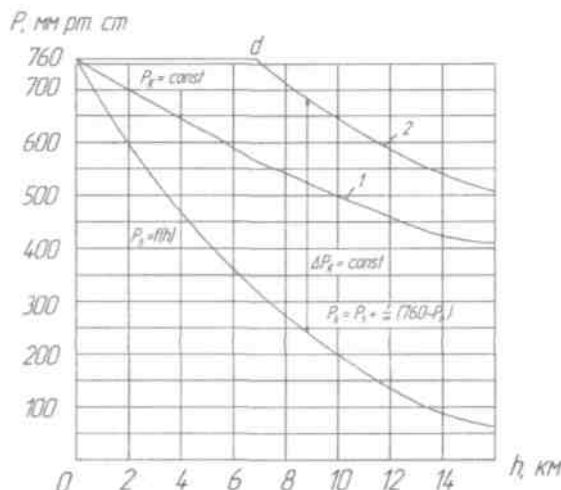


Рис. 6.4.

Таким образом, чем больше m , тем круче опускается вниз кривая изменения давления в отсеке.

В последнее время для герметизированных салонов пассажирских самолетов применяется такой закон регулирования, когда до определенной высоты (кривая 2 на рис. 6.4) в кабине поддерживается давление, равное наземному, а затем, на больших высотах, сохраняется постоянный перепад давлений между атмосферой и салоном.

Опыт эксплуатации самолетов с герметизированными салонами (или отсеками) показывает, что температура воздуха внутри герметизированного пространства распределяется неравномерно, не сохраняет постоянства при различных режимах полета и может, в известных пределах, отличаться от заданной.

Так, номинальная температура для салонов пассажирских самолетов установлена $+21^{\circ}\text{C}$ с точностью ее поддержания во время полета $\pm 3^{\circ}\text{C}$, а для необслуживаемых отсеков самолетов – до $+40^{\circ}\text{C}$ с более широкими пределами ее регулирования. Это связано с техническими трудностями охлаждения энергонасыщенных отсеков, в частности, с необходимостью использования агрегатов и устройств самолетной системы охлаждения, обладающих большой массой.

Неравномерность распределения температур в герметизированном объеме фюзеляжа самолета обусловлена тем, что внутри объема, а также между объемом и окружающей его атмосферой происходят сложные процессы обмена тепла. В общем случае температурный режим герметизированного объема самолета зависит от следующих факторов:

- скорости и высоты полета;
- характера распределения теплового пограничного слоя на наружной поверхности фюзеляжа;
- качества теплоизоляционной защиты герметичного объема;
- количества аккумулированного тепла (или холода) в обшивке фюзеляжа и в массе оборудования при стоянке самолета на аэродроме;
- значения солнечной радиации;
- типа источника наддува и его высотные характеристики;
- количества тепла, выделяемого различными источниками, находящимися внутри гермообъема;
- типа авиационного двигателя и его расположения относительно герметизированной части фюзеляжа.

В реальных условиях полета с целью стабилизации температуры в определенных пределах герметический салон либо обогревают, либо охлаждают в зависимости от того, какие факторы оказывают основное влияние на его температурный режим.

При размещении аппаратуры в негерметизированных отсеках самолета на ее работу оказывают влияние внешние условия, определяемые земной атмосферой: с изменением высоты полёта в той или иной степени изменяются такие основные параметры, характеризующие состояние земной атмосферы, как давление, плотность, температура и влажность воздуха.

В этом случае обычно исходят из предположения, что на аппаратуру воздействуют давление и температура в соответствии с параметрами воздуха за бортом самолета. На самом деле это справедливо лишь в отношении давления, но не температуры.

Так, при положительной температуре в наземных условиях истинные значения температуры внутри фюзеляжа при наборе самолетом высоты не соответствуют температуре за бортом, что объясняется наличием тепла, аккумулированного в обшивке фюзеляжа и в массе оборудования при стоянке самолета на аэродроме. При этом, чем выше температура окружающего воздуха на земле, тем больше запас аккумулированного тепла и тем медленнее происходит процесс понижения температуры в полете. Предел понижения температуры в негерметизированном объеме может приближаться к значению температуры за бортом, но истинное значение температуры обычно остается несколько выше температуры окружающего самолет воздуха.

Ранее упоминалось, что тепловой режим РЭС существенно зависит от ее работы.

Различают два основных режима работы: непрерывный и циклический (или периодический), параметры которых оговариваются в тактико-технических требованиях на аппаратуру.

Непрерывный режим в радиосвязной аппаратуре может иметь место при работе:

- на передачу, при полной нагрузке по мощности;
- на прием, при отсутствии нагрузки по мощности;
- в «дежурном режиме», при слабой нагрузке по мощности. Таким образом, в теплонагруженных блоках наиболее легкими

видами непрерывной работы (нагрузка по отдаваемой мощности отсутствует) являются «дежурный» режим и режим работы на «прием», а наиболее напряженным - режим работы «на передачу».

Следует заметить, что всегда имеется определенное время установления теплового режима в блоках аппаратуры, в течение которого температура в блоках, стабилизируется и в дальнейшем не возрастает выше определенного предела Δt зависящего от температуры окружающей среды (рис. 6.5).

Время установления теплового режима обычно составляет 30-60 мин и зависит от массы и материалоемкости блока.

Обычно непрерывный режим работы аппаратуры рассчитывается, исходя из предельных значений температуры окружающей среды ($\Delta t_{пред} = + 60\text{ }^{\circ}\text{C}$), т.е. для экстремальных условий. Так как эти условия существенно влияют на «температурную усталость» элементной базы, а следовательно, и на надежность аппаратуры, необходимо стремиться, чтобы температура блоков в установившемся режиме была несколько ниже (примерно на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) допустимого предельного значения $\Delta t_{пред}$.

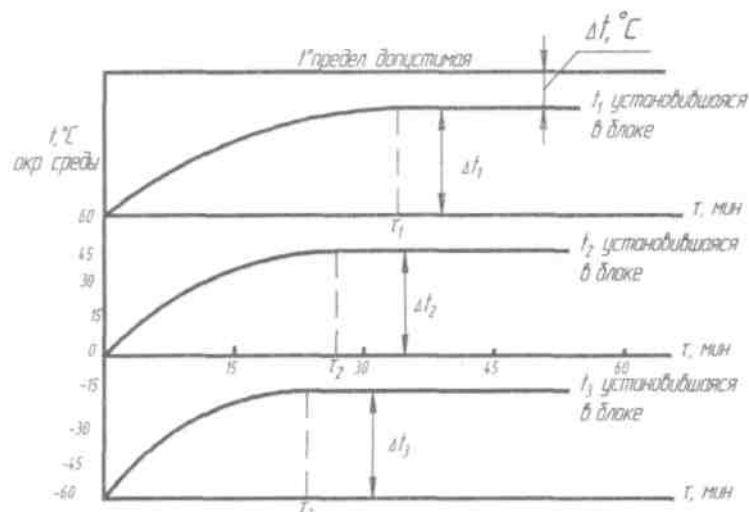


Рис. 6.5. Перегрев в блоках $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$, при непрерывном режиме работы в зависимости от температур окружающей среды

Из рис. 6.5 видно, что диапазон изменения рабочих температур в блоке зависит от температуры окружающей среды. В самолетной аппаратуре этот процесс может протекать довольно скоротечно и носить характер температурных ударов. Стабилизация внешних температур в необходимых пределах может быть достигнута за счет размещения аппаратуры в кондиционированных гермоотсеках летательных аппаратов.

Циклический (или периодический) режим характеризуется работой аппаратуры в определенные короткие промежутки времени, когда рассеивается максимальная мощность.

Параметры циклического режима, оговариваемые в ТТТ на аппаратуру, относятся в основном к периодичности работы теплонагруженных блоков.

Наиболее распространенные режимы циклической работы для радиосвязной бортовой аппаратуры имеют следующую периодичность:

5 мин «передача» - 15 мин «прием»;

5 мин «передача» - 10 мин «прием»;

3 мин «передача» - 5 мин «прием».

Естественно, что эти соотношения в зависимости от тактических и полетных задач могут варьироваться.

При определении допустимого перегрева блоков руководствуются теми же соображениями, что и в случае режима непрерывной работы.

Типовой характер теплового режима блока при циклическом режиме работы приведен на рис. 5.6.

Циклический режим работы характерен не только для теплонагруженных блоков или аппаратуры, в состав которой они входят, но и для аппаратуры, работа которой определяется регламентом ведения связи (например, аппаратура рейсового пассажирского самолета, предназначенная для связи экипажа самолета с наземными пунктами при прохождении трассы). Регламент связи определяется заранее, исходя из запланированного объема информации и времени ведения связи.

С другой стороны, та же аппаратура, установленная на самолете, выполняющем спасательные, поисковые, разведывательные и другие подобные задачи, должна обеспечить нерегламентированную по времени радиосвязь.

Отсюда следует, что в целях использования аппаратуры в различных условиях применения необходимо проектировать ее, исходя из возможности работы в непрерывном или неоговоренном по регламенту режимах.

В целях обеспечения тепловых режимов РЭС необходимо при ее проектировании учитывать следующие группы исходных данных по условиям эксплуатации:

- температуру и давление окружающей среды, а также диапазоны изменения температур и давлений (если температура и давление связаны между собой определенной зависимостью, во внимание принимаются их экстремальные значения);
- условия размещения (привязка к зонам планера, размещение в герметизированном или негерметизированном объеме и т.д.);
- режимы работы аппаратуры (непрерывный или циклический);
- принцип построения системы охлаждения (с использованием либо централизованной самолетной, либо автономной систем).

На рис. 6.6 представлен график перегрева в теплонагруженных блоках при циклическом режиме работы в зависимости от температуры окружающей среды, где заштрихованы периоды работы в режиме передачи.

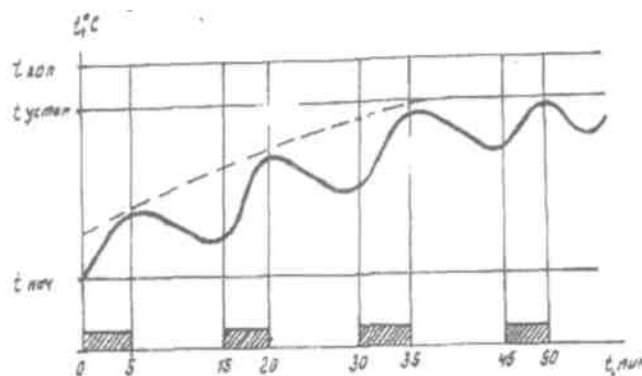


Рис. 6.6.

Эти данные оговариваются в ТТТ на разрабатываемую аппаратуру, уточняются в процессе согласования условий размещения аппаратуры на объектах и являются отправными при разработке и расчете систем охлаждения с учетом массы, объема, энергоемкости, теплонагруженности и конструктивных особенностей составных частей аппаратуры – блоков РЭС.

В общем случае при расчете теплового режима аппаратуры исходят из того, что она должна надежно функционировать с сохранением всех характеристик при следующих окружающих условиях:

- в диапазоне температур от -60 до $+60$ $^{\circ}\text{C}$;
- при кратковременном воздействии (30 мин) повышенной температуры $+70$ $^{\circ}\text{C}$;
- при минимальном давлении 106 мм рт.ст. для самолетов гражданской авиации и 5 мм рт.ст. для военных самолетов.

В отдельных случаях значения рабочих температур и давлений окружающей среды могут несколько отклоняться от указанных выше в зависимости от типов самолетов, условий полета и их режимов, а также от места размещения аппаратуры.

Большинство изделий РЭА обладают низкими КПД, за исключением радиопередающих устройств ($\eta = 0,2 \div 0,3$), усилителей мощности ($\eta = 0,25$) и источников электропитания ($\eta = 0,5 \div 0,8$).

Большая часть энергии, потребляемой от источников питания преобразуется в тепловую. В этой связи возникает проблема обеспечения тепловых режимов.

При конструировании стремятся энергию, преобразованную в тепло вывести за пределы конструкции, чтобы исключить перегрев.

Показатели тепловых режимов.

t_j – температура в некоторой точке в пределах конструкции;

Δt_j – перегрев;

t_s – температура окружающей среды.

$$\Delta t_j = t_j - t_s$$

#Температурное поле – пространственно-временное распределение температуры в пределах конструкции.

Температурное поле называется стационарным, если значение температуры не зависит от времени.

Стационарному температурному полю соответствует стационарный тепловой режим: температуры достигают своих максимальных значений.

Тепловой поток, рассеиваемый изделием:

$$P = \frac{Q}{\tau} [Bm], \text{ где } Q - \text{количество тепла, рассеиваемое изделием, } \tau - \text{время.}$$

Тепловой режим изделия считается нормальным, если выполняются следующие условия:

1. Температура в любой точке в пределах конструкции не превышает допустимую рабочую температуру наименее термостойкого элемента:

$$t_j \leq t_{эл. min}$$

2. Температура в любой точке изделия такова, что обеспечивается функционирование изделия с заданной точностью и надежностью в заданных условиях эксплуатации (более жесткое условие, чем п. 1).

Теплофизическая структура конструкций РЭС

При анализе тепловых режимов РЭС реальные изделия заменяются моделями в которых предусматривают следующую структуру:

1. Нагретая зона – часть изделия, в которой сосредоточены источники тепла. (Примеры: ПП с РЭ, совокупность плат в блоках разъемного и книжного типа).

2. Изотермическая поверхность – часть изделия, в каждой точке которой температуры одинаковы или условно одинаковы (пример: поверхность кожуха корпуса, поверхность нагретой зоны, поверхность корпуса отдельного РЭ).

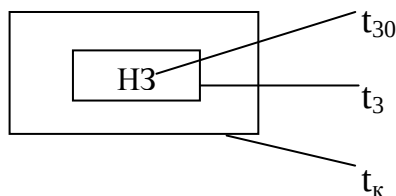
3. Изотропные и анизотропные однородные тела.

#Изотропное тело – это тело, у которого теплофизические характеристики одинаковы по всем направлениям осей координат (например, коэффициенты теплопроводности

материала тела $\left[\frac{Bm}{m \cdot ^\circ C} \right] - \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$).

Для анизотропного тела $\lambda_x \neq \lambda_y \neq \lambda_z$

При анализе тепловых режимов реальной конструкции или её части часто пользуются моделью однородного анизотропного тела. В данной модели нагретая зона представляет собой однородное анизотропное тело.



Механизмы передачи тепла. Тепловые модели типовых конструкций РЭС с системами естественного воздушного охлаждения (критерии).

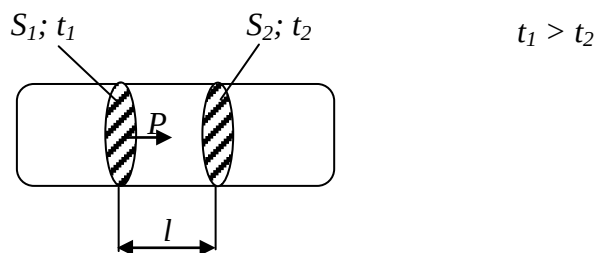
Способы передачи тепла

1. Теплопроводность (кондукция).
2. Конвекция.
3. Излучение.

1 Теплопроводность

Передача тепла осуществляется за счет непосредственного контакта частиц тела (молекул). Тепло передается от более нагретых частиц к менее нагретым. Способ характерен для поверхностей твердых тела также неподвижных жидкостей и газов.

Для анализа теплопередачи кондукцией рассмотрим модель:



По закону Фурье:

$P = \alpha_T \cdot S_{cp} (t_1 - t_2)$, где α_T – коэффициент передачи теплопроводностью,
 S_{cp} – площадь средней изотермической поверхности,

$(t_1 - t_2)$ – перегрев на поверхности S_1 относительно S_2 .

$\alpha_T = \frac{\lambda}{l} \left[\frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$, где λ – коэффициент теплопроводности материала
 (табличная величина).

Все материалы с высокой электропроводностью обладают так же высокой теплопроводностью.

$$S_{cp} = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

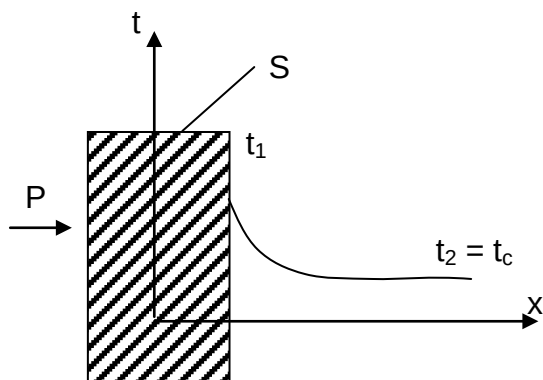
Соотношение для теплового потока может быть использовано для определения температуры поверхности S_1 при известной температуре поверхности S_2 .

Анализ теплового режима при передаче теплопроводностью не представляет затруднений, если задан тепловой поток, теплофизические характеристики материала и геометрические размеры тел.

2 Конвекция.

При теплопередаче конвекцией, тепло от поверхности нагретого тела отбирается теплоносителем, который за счет естественного или принудительного движения перемещается относительно поверхности нагретого тела. Теплоносителем служит воздух или жидкость.

Естественное движение теплоносителя возникает за счет изменения его плотности при нагревании. При естественном движении теплоносителя говорят о естественном конвективном теплообмене.



Принудительное движение организуется с помощью вентиляторов, воздуходувок и нагнетателей – принудительный конвективный теплообмен.

Тепловой поток при конвективной передаче определяется с помощью уравнения Ньютона:

$$P = \alpha_K \cdot S(t_1 - t_2) \quad \text{где} \quad \begin{array}{l} \alpha_K - \text{коэффициент передачи конвекцией,} \\ S - \text{площадь поверхности теплообмена,} \\ t_1 - \text{температура нагретой поверхности,} \end{array}$$

$t_2 = t_c$ – температура окружающей среды.

Применение данного выражения затруднено сложностью определения α_K , который зависит от теплофизических параметров теплоносителя, температур среды и нагретой поверхности, формы нагретого тела.

$$\alpha_K = \alpha_K(t_1, t_2, \lambda, C_{cp}, g, \rho, \nu, \beta, \Phi), \quad \text{где}$$

- λ – коэффициент теплопроводности среды,
- C_{cp} – удельная теплоемкость среды,
- g – ускорение силы тяжести,
- ν – коэффициент кинематической вязкости среды,
- β – коэффициент объемного расширения среды,
- Φ – группа параметров, характеризующих размеры и форму нагретого тела.

Все параметры в скобках зависят от t_1 и t_2 . Зависимость α_K от t_1 , которая неизвестна, не позволяет находить α_K прямым способом. Все теплофизические параметры ($\beta, \lambda, C_{cp}, \nu$) так же зависят от t_1 и t_2 .

Все эти зависимости не позволяют однозначно выбрать из таблицы значение α_K .

Поэтому для его определения используется подход, основанный на применении критериальных уравнений.

Критерии подобия представляют собой безразмерные величины, определенные через группы теплофизических характеристик среды. Критерии подобия служат для характеристики физических процессов.

При анализе теплообмена будем использовать четыре критерия подобия.

Критериальные уравнения

Критерий Нуссельта:

$Nu = \frac{\alpha_K \cdot L}{\lambda}$, где α_K – конвективный коэффициент передачи,

L – характерный размер конструкции.

λ – коэффициент теплопроводности среды.

Знание критерия Нуссельта позволяет через известные λ и L найти α_K .

Применяется при определении α_K для естественной конвекции при ограниченном или неограниченном пространстве.

Критерий Грассгофа:

$$Gr = \beta \cdot g \frac{L^3}{\lambda^3} (t_1 - t_2)$$

Через критерий Грассгофа определяют критерий Нуссельта для условий естественной и принудительной конвекции на ограниченном или неограниченном пространстве.

Критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \text{ где } a \text{ определяется по формуле: } a = \frac{\lambda}{C_{cp} \cdot \rho_{cp}}.$$

Критерий Прандтля совместно с критерием Грассгофа используются для определения критерия Нуссельта.

Критерий Рейнольдса:

$Re = \frac{V \cdot L}{\nu}$, V – скорость движения теплоносителя относительно поверхности нагретого тела.

Данный критерий используется при определении λ_K при вынужденной конвекции.

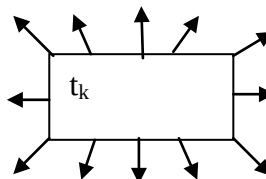
Определение λ_K при естественной конвекции в неограниченном пространстве.

К этому случаю относится обмен между поверхностью корпуса конструкции и окружающей средой.

Для определения λ_K находят критерий Нуссельта:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n,$$

где C – коэффициент, зависящий от произведения $Gr \cdot Pr$,
 n – показатель теплообмена.



$n = 0$ Режим движения теплоносителя – пленочный поток, т.е. движение теплоносителя в тонком слое над нагретой поверхностью. Скорость потока мала.

$n = 1/8$ Ламинарный поток. Скорость теплоносителя в поперечном сечении одинакова. Эффективность теплообмена низка.

$n = 1/4$ Переходной режим от ламинарного потока к вихревому.

$n = 1/3$ Вихревой режим – наиболее эффективная теплопередача.

Значения C и n определяются по таблице, в зависимости от произведения $Gr \cdot Pr$.

Схема определения α_K

Исходными данными для расчета α_K служат температура окружающей среды (t_2) и геометрические размеры нагретого тела, а так же его форма.

Расчет:

1. Определение характерного размера L .

Для тел в форме прямоугольного параллелепипеда:

$$L = \sqrt{\frac{S_K}{6}}, \quad S_K - \text{площадь поверхности тела};$$

L – представляет собой ребро эквивалентного куба.

Для других типов конструкций L имеет другое толкование:

Вертикально расположенная стенка $L = h$ (высота стенки).

Горизонтально расположенная стенка $L = l$ (длина стенки).

Для поверхности в виде шара $L = D$ (диаметр).

Для поверхности в виде цилиндрической трубы $L = D$ (трубы).

2. Нужно задаться произвольным перегревом поверхности теплообмена в пределах $10 \div 15^\circ\text{C}$, после чего найти:

$$t_1 = t_2 + \Delta t.$$

3. Найти среднее значение температуры теплоносителя:

$$t_{cp} = \frac{(t_1 + t_2)}{2}$$

4. Для найденного значения t_{cp} из таблиц выбираются теплофизические параметры теплоносителя – λ , ν , a , β и т.д.

5. Нахождение критерии Грассгофа и Прандтля:

$$Gr = \beta \cdot g \cdot \frac{L^3}{\nu^2} \cdot (t_1 - t_2) \quad | \quad Pr = \frac{\nu}{a} \quad \text{для воздуха } Pr = 0,7.$$

6. По произведению $Gr \cdot Pr$ в таблице выбирается C и n .

7. Нахождение критерия Нуссельта: $Nu = C(Gr \cdot Pr)^n$.

8. Нахождение α_K : $\alpha_K = Nu \cdot \frac{\lambda}{L}$

Передача тепла осуществляется потоком фотонов от источника тепла к приемнику.

При теплопередаче излучением тепловой поток и характеристики нагретого тела связаны уравнением Стефана-Больцмана:

$$P_{\pi} = \varepsilon_{\pi\pi} \varphi_{12} C_0 S \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right]$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^4)$ – коэффициент излучения "абсолютно черного" тела;

$\varepsilon_{\pi\pi}$ – приведенная степень черноты поверхностей тел, участвующих в теплообмене;

φ_{12} – коэффициент облученности, показывающий, какая часть энергии, излучаемой первым телом, попадает на второе;

S – площадь поверхности источника тепла.

В результате несложных преобразований уравнение приводится к виду:

$$P_{\pi} = \alpha_{\pi} S (t_1 - t_c)$$

где $\alpha_{\pi} = \varepsilon_{\pi\pi} \varphi_{12} f(t_1 - t_c)$ – коэффициент теплопередачи излучением.

Коэффициент теплопередачи излучением находится по номограмме, если $\varepsilon_{\pi\pi}$ отличается от 0,8.

Электротепловая аналогия.

Между процессами теплообмена в тепловых цепях и электрическими проводниками имеет место электротепловая аналогия. Принцип электротепловой аналогии базируется на сравнительном анализе законов Ома для электрических цепей и выражений для тепловых потоков в тепловых цепях.

Электрическая цепь	Тепловая цепь
Электрический ток: $J_{\mathcal{E}}$	Тепловой поток: P_T, P_K, P_L
Электрическая проводимость: $\sigma_{\mathcal{E}}$	Тепловая проводимость: $\sigma_T, \sigma_K, \sigma_L$
Электрическое сопротивление: $R_{\mathcal{E}}$	Тепловое сопротивление: R_T, R_K, R_L
Электрический потенциал: φ	Температура: t

$$J_{\mathcal{E}} = \sigma_{\mathcal{E}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$P_T = \alpha_T \cdot S_{\text{CP}}(t_1 - t_2)$$

$$P_K = \alpha_K \cdot S(t_1 - t_2)$$

$$P_L = \alpha_L \cdot S(t_1 - t_2)$$

$$\sigma_T = \alpha_T \cdot S_{\text{CP}} = \frac{\lambda}{l} \cdot S_{\text{CP}}$$

$$R_T = \frac{1}{\sigma_T}$$

$$\sigma_K = \alpha_K \cdot S$$

$$R_K = \frac{1}{\sigma_K}$$

$$\sigma_L = \alpha_L \cdot S$$

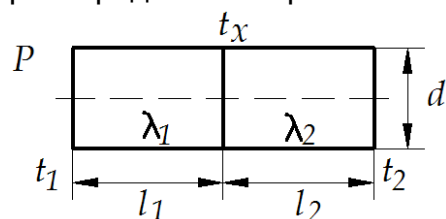
$$R_L = \frac{1}{\sigma_L}$$

На основе принципа электротепловой аналогии процессы в тепловых цепях можно представлять тепловыми схемами, основными элементами которых являются тепловые проводники, тепловые проводимости, источники тепла и т.д. Узлам тепловых схем соответствуют определенные значения температур.

Тепловые схемы могут быть преобразованы в соответствии с законами Ома и Кирхгофа для тепловых цепей.

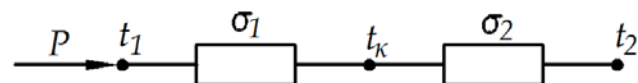
Примеры составления тепловых схем.

I) Составить тепловую схему процесса теплообмена в цилиндре, состоящем из двух разнородных материалов.



При составлении тепловой схемы примем в рассмотрение только передачу тепла теплопроводностью. При известной t_c выражаем t_1 и t_2 .

Составим тепловую схему:



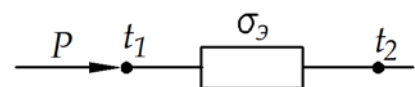
$$\sigma_1 = \frac{\lambda_1}{l_1} \cdot S_{cp} = \frac{\lambda_1}{l_1} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$\sigma_2 = \frac{\lambda_2}{l_2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$t_k = t_2 + \frac{P}{\sigma_2}$$

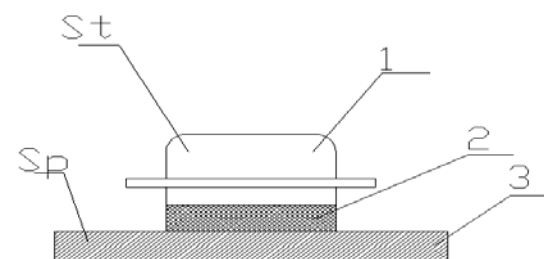
$$t_1 = t_k + \frac{P}{\sigma_1}$$

Преобразуем схему:



$$\sigma_3 = \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$$

II) Составить тепловую схему теплообмена транзистора, установленного на радиаторе:



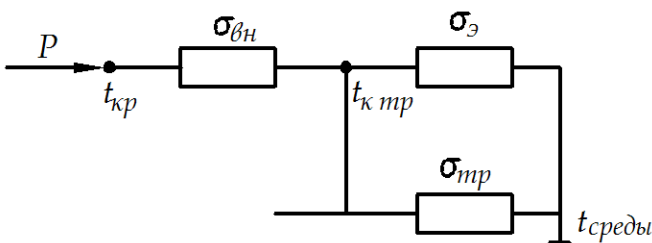
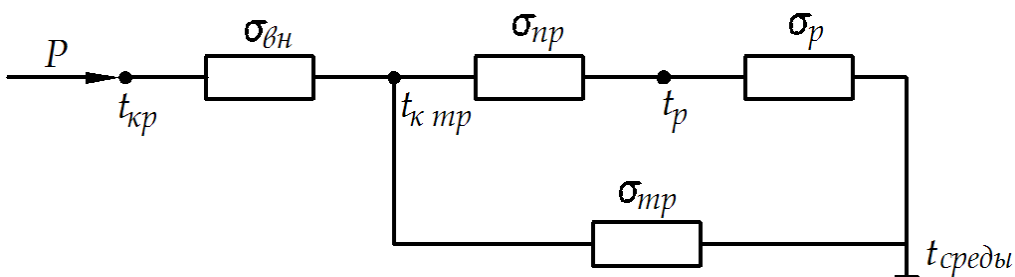
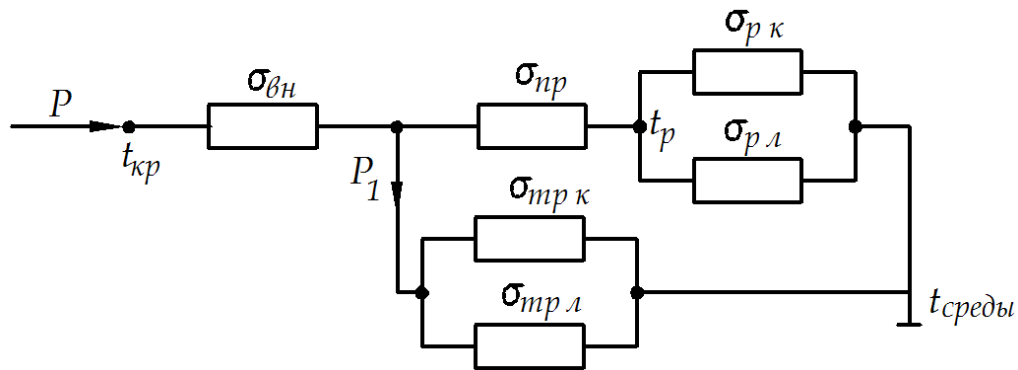
- 1 – транзистор,
- 2 – диэлектрическая прокладка,
- 3 – радиатор.

Процесс теплообмена происходит следующим образом:

1. Тепло выделяется на кристалле и вводится на корпус транзистора.
2. С корпуса часть тепла рассеивается в окружающее пространство конвекцией и излучением, другая часть через диэлектрическую прокладку переходит на радиатор посредством теплопроводности.
3. С радиатора тепло конвекцией и излучением рассеивается в окружающее пространство.

Для данной модели пренебрегаем тепловым сопротивлением транзистор-прокладка и прокладка-радиатор.

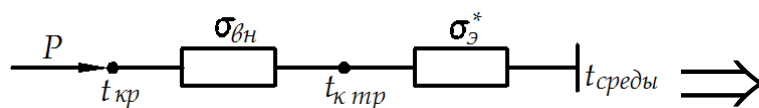
Составим тепловую схему:



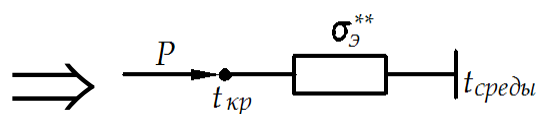
$$\sigma_p = \sigma_{pk} + \sigma_{pl}$$

$$\sigma_{tr} = \sigma_{trk} + \sigma_{trl}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_{tr} \cdot \sigma_p}{\sigma_{tr} + \sigma_p}$$



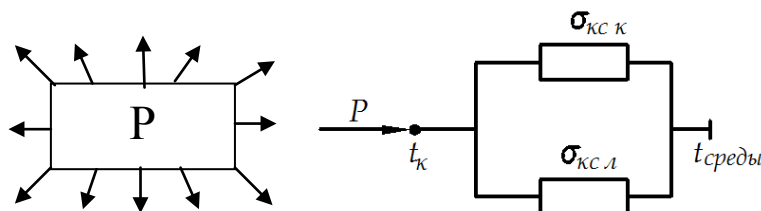
$$\sigma_{\theta}^* = \sigma_{\theta} + \sigma_{tr}$$



$$\sigma_{\theta}^{**} = \frac{\sigma_{\theta}^* \cdot \sigma_{bn}}{\sigma_{\theta}^* + \sigma_{bn}}$$

$$t_K = t_C + \frac{P}{\sigma_{\Sigma}^{**}}$$

III) Составить тепловую схему процесса теплообмена корпуса блока с окружающей средой.



L_x, L_y, L_z – размеры блока.

$$\sigma_{КСК} = \alpha_K S_K$$

$$\sigma_{КСЛ} = \alpha_L S_K$$

$$S_K = 2 (L_x L_y + L_x L_z + L_y L_z)$$

$$t_K = t_C + \frac{P}{\sigma_{КСК} + \sigma_{КСЛ}}$$

Методы теплового моделирования и расчета тепловых режимов конструкций РЭС.

Методы теплового моделирования

Конструкции блоков бортовых РЭС условно можно разделить на конструкции с объемными структурами нагретых зон (книжной или разъемной) и на конструкции с распределением источников тепла в одной плоскости (планарные).

Схематическое изображение блока конструкции с объемными структурами нагретых зон и его тепловая схема, отображающая процесс теплообмена, приведены на рис. 6.7.

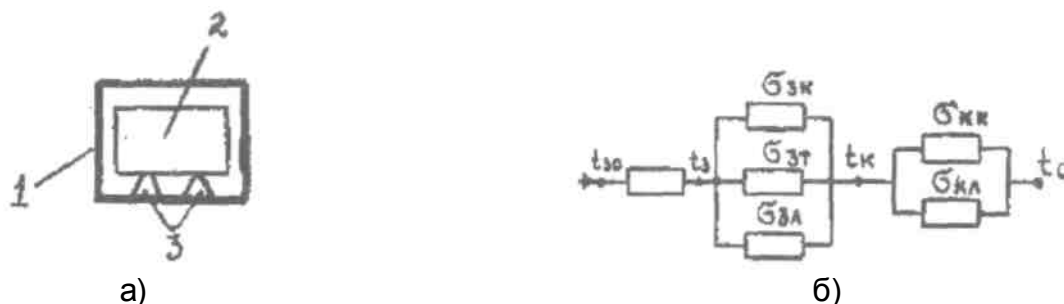


Рис. 6.7.

Блок функциональных ячеек (нагретая зона) 2 размещен в корпусе 1 и закрепляется с помощью установочных элементов 3 (рис. 6.7 а). Поверхности корпуса и нагретой зоны приняты за изотермические с температурами t_K и t_3 . Источники тепла в нагретой зоне распределены равномерно. Суммарную мощность источников тепла, обозначим P , (Bm). Тепло с поверхности нагретой зоны конвекцией σ_{3K} , теплопроводностью через элементы крепления σ_{3T} и излучением (лучеиспусканием) через воздушные промежутки σ_{3L} передаются на корпус. Передача тепла с корпуса окружающей среде с температурой t' осуществляется за счет конвекции σ_{KK} и излучения σ_{KL} (рис. 6.7 б). При определении

конвективного и лучевого коэффициентов теплопередачи можно использовать номограммы. Температура в центре нагретой зоны зависит от эквивалентной тепловой проводимости нагретой зоны σ_{30} , величину которой находят в результате замены нагретой зоны конструкции моделью в виде однородного анизотропного тела.

Схематическое изображение конструкции блоков планарной формы их и тепловая схема представлены на рис. 6.8.

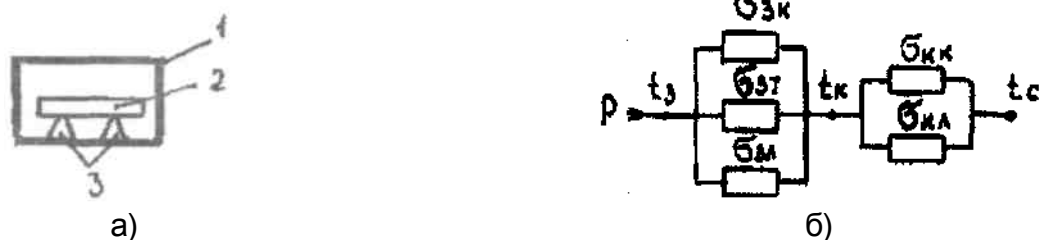


Рис. 6.8

Особенностью таких конструкций является равномерное распределение источников тепла в одной плоскости. Механизмы теплообмена и тепловая модель в целом аналогичны конструкциям с объемными структурами нагретых зон (см. рис. 6.7). Однако размещение тепловыделяющих элементов в плоскости дает возможность при оценке теплового режима ограничиться расчетом среднеповерхностной температуры нагретой зоны, которая с небольшой погрешностью может быть принята в качестве характеристики теплового режима элементов.

Конструкции аналоговой МЭА на металлических основаниях

Типичный представитель – конструкция в корпусе типа “пенал”. Упрощенное изображение конструкции приведено на рис. 6.9 а.

Бескорпусные микросборки 1 размещены на металлическом основании 2, которое устанавливается в корпус 3. Характерная особенность конструкции – передача тепла от элементов микросборок к корпусу осуществляется через внутреннюю тепловую проводимость элементов $\sigma_{вн}$, тепловую проводимость подложки σ_n и проводимость клеевого соединения подложки микросборки и основания $\sigma_{кл}$. Основание и корпус можно принять за изотермическую поверхность. Передача тепла с поверхности корпуса среде осуществляется конвекцией и излучением. При условии, что в пределах каждой из n микросборок отсутствует взаимное тепловое влияние между элементами, тепловая схема может быть представлена в виде рис. 6.9 б. Значения тепловых проводимостей σ_n , $\sigma_{кл}$ рассчитывают через известные коэффициенты теплопроводности и геометрические размеры элементов конструкций. Значения внутренних тепловых проводимостей для бескорпусных ИС и транзисторов берут из справочников или находят с учетом конструкции кристалла и способа его установки на подложке.

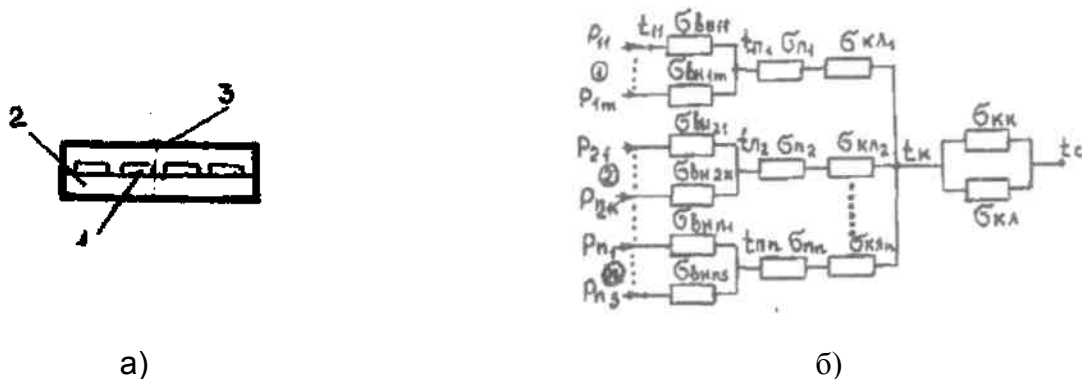


Рис. 6.9.

После построения тепловой модели конструкции на основе принципа электротепловой аналогии составляют тепловую схему, рассчитывают величины тепловых сопротивлений (проводимостей) и в результате преобразования схемы находят температуры или перегревы в нужных узловых точках.

Расчёт теплового режима блоков разъёмной и книжной конструкций

1. Методика расчета среднеповерхностной температуры корпуса по методу последовательных приближений

Исходные данные: длина A , ширина B , высота H корпуса блока, ε_K – степень черноты его поверхности, максимальное значение температуры окружающей среды t_{Cmax} , мощность рассеивания в блоке P .

Порядок расчета:

1) задают перегрев корпуса Δt_K^1 относительно окружающей среды, в первом приближении равный 5...10 °C.

2) определяют температуру корпуса в первом приближении:

$$t_K^I = t_{Cmax} + \Delta t_K^I \quad (5.1)$$

3) находят среднюю температуру Δt_m^I между корпусом и средой в первом приближении:

$$\Delta t_m^1 = 0,5(t_K^I + t_{Cmax}) \quad (5.2)$$

4) рассчитывают площадь S_K поверхности корпуса:

$$S_K = 2(AB + BH + AH), м^2 \quad (5.3)$$

5) находят определяющий размер L , эквивалентного куба:

$$L = \sqrt[3]{S_K/6}, мм \quad (5.4)$$

6) определяют вид теплового потока от корпуса в среду по условию:

$$\Delta t_K^I \leq (840/L)^3, °C \quad (5.5)$$

Если условие выполняется, то существует закон степени 1/4, если нет – то закон степени 1/3.

7) находят по номограммам коэффициент конвекции α_K (рис. 5.42 – для закона 1/4, рис. 5.43 – для закона 1/3) от корпуса в среду и аналогичный коэффициент лучеиспускания (излучения) $\alpha_L = \alpha'_L \varepsilon_K / 0,8$ (Рис. 5.44), где α'_L – значение этого коэффициента по номограмме, 0,8 – степень черноты стали.

8) рассчитывают суммарную тепловую проводимость σ_Σ^I – от корпуса в среду:

$$\sigma_\Sigma^I = \sigma_{KK} + \sigma_{KL} = (\alpha_K + \alpha_L) S_K, Вт/°C \quad (5.6)$$

9) находят реальный перегрев корпуса $\Delta t_{кр}^I$ в первом приближении:

$$\Delta t_{кр}^I = P / \sigma_\Sigma^I, °C \quad (5.7)$$

10) проверяют условие:

$$|\Delta t_{кр}^I - \Delta t_K^I| \leq 2...3, °C \quad (5.8)$$

11) если условие 10 выполняется, то принимают перегрев корпуса $\Delta t_K = \Delta t_{кр}^I$, если нет – то проводят расчет во втором приближении, принимая $\Delta t_K^II = \Delta t_{кр}^I$, и корректируя пп.2...10. Расчет заканчивается в том приближении, в котором условие (5.8) выполняется.

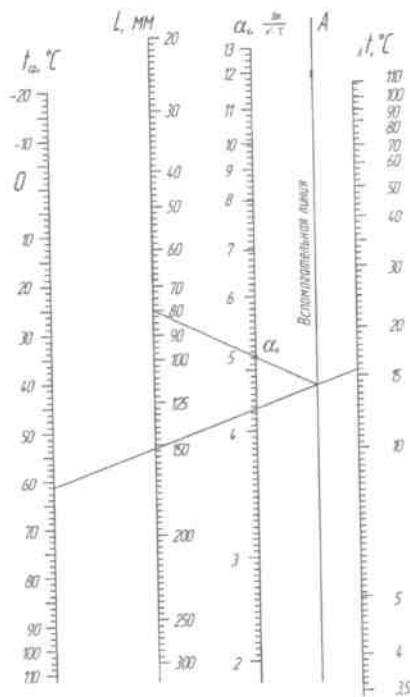


рис. 6.10



рис. 6.11

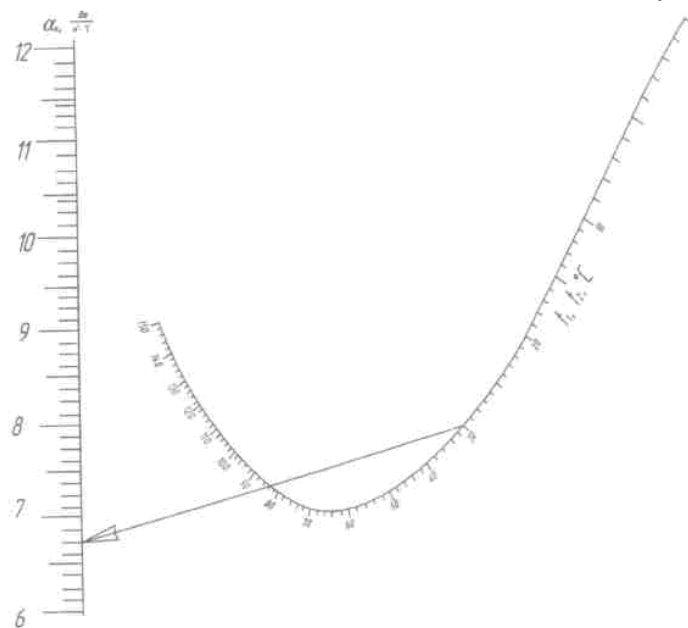


Рис. 6.12.

2. Методика расчета среднеповерхностной температуры корпуса по методу тепловых характеристик.

Исходные данные: те же, что и в методике 1.

Порядок расчета:

Пп. 1...8 – выполняются по методике 1.

9) рассчитывают мощность P_1 , которая может создавать заданный перегрев Δt_k^1 ;

10) строят график зависимости Δt_k от P по двум точкам: начала координат 0 и точке с найденными координатами P_1 и Δt_k^1 . Такая зависимость (как правило, она линейна, и поэтому строят ее лишь по двум точкам) называется тепловой характеристикой блока.

11) по заданной мощности P рассеивания в блоке и тепловой характеристике определяют искомый перегрев Δt_{κ} корпуса блока и температуру его поверхности:

$$t_{\kappa} = t_{C\max} + \Delta t_{\kappa} \quad (5.9)$$

3. Методика расчета среднеповерхностной температуры нагретой зоны из ФЯ на печатных платах.

Исходные данные: длина a , ширина b и высота h нагретой зоны, температура и перегрев корпуса t_{κ} и Δt_{κ} , найденные по методике 1 или 2, мощность рассеивания в блоке P , длина A , ширина B , высота H и толщина стенок корпуса Δ , степени черноты ε_1 внутренних поверхностей кожуха и ε_2 – поверхности нагретой зоны.

Порядок расчета:

1) задают среднеповерхностную температуру нагретой зоны в первом приближении:

$$t_3^1 = t_{\kappa} + 2\Delta t_{\kappa} \quad (5.10)$$

2) определяют площади внутренних поверхностей стенок корпуса и нагретой зоны:

$$S'_K = 2[(A - \Delta)(B - \Delta) + (B - \Delta)(H - \Delta) + (A - \Delta)(H - \Delta)], \text{ м}^2 \quad (5.11)$$

$$S_3 = 2(ab + bh + ah), \text{ м}^2$$

3) определяют средний зазор между корпусом и нагретой зоной:

$$\delta = \frac{(A + B + H) - (a + b + h)}{6}, \text{ м} \quad (5.11)$$

4) рассчитывают коэффициент теплопередачи в воздушном зазоре:

$$\text{при } \delta / l \leq 0,1 \quad \text{и} \quad \text{GrPr} < 10^3 \quad k_{\text{воз}} = \lambda_{\text{воз}} / \delta \quad (5.13)$$

$$\text{при } \delta / l > 0,1 \quad k_{\text{воз}} = 0,453 \left(\frac{t_3^1 - t_{\kappa}}{\delta} \right), \quad (5.14)$$

$$\text{где } l = \sqrt{bh}, \text{ м} \quad (5.15)$$

при условии, что $a > b$ и $a > h$.

5) критерии Gr и Pr рассчитывают по данным табл. 5.5.:

$$Gr = \beta \cdot g \frac{L^3}{\nu^2} (t - t_c), \quad Pr = \frac{\nu}{a}, \quad \beta = \frac{1}{t_c + 273} \quad (5.16)$$

L – определяющий размер, a – теплопроводность газа, g – ускорение силы тяжести, β – коэффициент объемного расширения газа, ν – коэффициент кинематической вязкости газа.

6) по номограмме рис. 6.12 определяют для двух точек t_{κ} и t_3^1 коэффициент лучеиспускания λ'_{λ} , и нормируют его для ε_{np} :

$$\lambda_{\lambda} = \lambda'_{\lambda} \varepsilon_{np} / 0,8, \% \quad (5.17)$$

7) рассчитывают тепловую проводимость от нагретой зоны к корпусу блока, принимая, что передача тепла от нагретой зоны к корпусу за счет теплопроводности σ_3 практически отсутствует:

$$\sigma_3 = \sigma_{3,K} + \sigma_{3l} = k_{\text{воз}} \frac{S'_K + S_3}{2} + \alpha_A S_3 \quad (5.18)$$

8) находят расчетное значение среднеповерхностной температуры нагретой зоны в первом приближении:

$$t_{zp}^I = t_{\kappa} + P / \sigma_3, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.19)$$

9) проверяют условие сходимости расчетного и заданного значений:

$$|t_3^I - \Delta t_{zp}^I| \leq 2...3, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.20)$$

10) если условие выполняется, то принимают $t_3 = \Delta t_{zp}^I$, если нет, то повторяют расчет во втором приближении, принимая $t_3^{\text{II}} = \Delta t_{zp}^I$.

Таблица 6.2.

$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\gamma, \frac{\text{кК}}{\text{м}^3}$	$C_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
-50	1,584	1010	2,04	9,23	0,728
-40	1,521	1010	2,12	10,42	0,724
-30	1,458	1010	2,20	11,60	0,720
-20	1,395	1010	2,28	12,79	0,716
-10	1,344	1010	2,36	13,04	0,712
0	1,293	1000	2,44	13,28	0,707
10	1,247	1000	2,51	14,16	0,705
20	1,205	1000	2,60	15,06	0,703
30	1,165	1000	2,68	16,00	0,701
40	1,128	1000	2,76	16,96	0,699
50	1,093	1000	2,83	17,95	0,698
60	1,060	1000	2,90	18,97	0,696
70	1,029	1000	2,97	20,02	0,694
80	1,000	1000	3,05	21,09	0,692
90	0,972	1000	3,13	22,10	0,690
100	0,946	1000	3,21	23,13	0,688
ПО	0,922	1000	3,28	24,29	0,687
120	0,898	1000	3,34	25,45	0,686

4. Методика расчета среднеповерхностной температуры нагретой зоны из ФЯ на металлических рамках.

Исходные данные: те же, что и в методике 3 и дополнительно: шероховатости поверхностей R_z , сопряжения рамки и бобышки (средние высоты их микронеровностей h_{cp1} и h_{cp2} соответственно), число n и диаметр d_b бобышек, диаметр d_6 стягивающих винтов, диаметр d_{6m} , титановых втулок.

Порядок расчета:

- 1) выполняют пп. 2...4 методики 3.
- 2) принимают коэффициент лучеиспускания от нагретой зоны к корпусу $\alpha_n = 7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.
- 3) определяют среднее значение коэффициента теплопроводности λ_{cp} , контактирующих поверхностей:

$$\lambda_{cp} = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2) \quad (5.21)$$

где λ_1 и λ_2 – соответственно коэффициенты теплопроводности рамки и бобышки (обычно $\lambda_1 = \lambda_2$).

Примечание: Контактный узел с элементами крепления включает в себя стальной винт, титановую втулку и полый алюминиевый цилиндр бобышки, куда запрессовывают втулку

с резьбой для винта (обычно $M3 \cdot (h + 5 \text{ мм})$). Коэффициенты теплопроводности стали ($\lambda_{cm} = 45 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$), титанового сплава ВТ1-0 ($\lambda_m = 15 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$) соответственно в 3,8 и 11,3 раза меньше коэффициента теплопроводности алюминия ($\lambda_A = 170 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$), поэтому, как показывают расчеты, составляет не более 3% от всей теплопроводности и им можно пренебречь.

4) по выбранной шероховатости поверхности: $R_z = h_{cp1} + h_{cp2}$ определяют среднюю высоту микронеровностей, где $h_{cp1,2}$ – высоты микронеровности обеих сопрягаемых поверхностей, относительную нагрузку: $P/E = 5 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ при $E > 10^{10} \text{ Па}$ контактных поверхностей, коэффициент B , характеризующий геометрию поверхности и коэффициент R_h , оценивающий заполнение профиля поверхности. Величина h_{cpi} равна цифре, стоящей на чертеже рядом с R_z и переведенной в метры. Так, для $R_z = 20 \text{ мкм}$ $h_{cp} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Величина B зависит от R_z и определяется по табл.6.3. Коэффициент профиля обычно берут равным $k_h = 0,55$.

Таблица 6.3.

$R_z, \text{мкм}$	10	20	30	40	50	60
B	20	18	16	14	13,5	13

5) рассчитывают удельные тепловые проводимости σ_{ydm} точек фактического контакта σ_{ydc} межконтактной среды:

$$\sigma_{ydm} = [2,12\lambda_{cp}(B \cdot P/E)^{0,8}] \cdot 10^4 \quad (5.22)$$

$$\sigma_{ydm} = \lambda_{\text{воз}} / 2h_{cp}k_h = 0,91\lambda_{\text{воз}}/h_{cp} \quad (5.23)$$

где $\lambda_{\text{воз}}$ – коэффициент теплопроводности межконтактной среды (воздух).

6) рассчитывают суммарную площадь теплопередачи кондукцией:

$$S_T = \frac{\pi}{4}n(d_o^2 - d_{\text{см}}^2), \text{ м}^2 \quad (5.24)$$

7) рассчитывают тепловую проводимость a_{3m} между нагретой зоной и корпусом:

$$\sigma_{3T} = (\sigma_{ydm} + \sigma_{ydc}) \cdot S_T, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad (5.25)$$

8) находят суммарную тепловую проводимость от корпуса в среду:

$$\sigma_3 = k_{\text{воз}} \frac{S'_K + S_3}{2} + \alpha_L S_3 + \sigma_{3T} \quad (5.26)$$

Примечание: как показывают расчеты реальных конструкций блоков, доля конвективного вида передачи составляет около 2%, доля передачи тепла за счет излучения – около 5%, поэтому в ряде случаев для оценочных расчетов первыми двумя составляющими выражения (5.26) можно пренебречь.

9) рассчитывают среднеповерхностную температуру нагретой зоны:

$$t_3 = t_K + P / \sigma_3, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.27)$$

5. Методика расчета температуры в центре нагретой зоны из ФЯ на металлических рамках.

В данной конструкции тепловые схемы нагретой зоны по координатным осям включают тепловые проводимости печатной платы, ребер и планок рамки, подложки, внутренних сопротивлений кристаллов и многочисленных воздушных каналов между ними. Однако наибольшей долей (более 96%) теплового потока обладают ребра жесткости (боковые по оси x , верхнее и нижнее – по оси y и верхнее с боковыми по площади контакта соседних ячеек по оси z). Это и учитывается в дальнейшем.

Исходные данные: длина a , ширина b и высота h нагретой зоны, ее среднеповерхностная температура t_3 , найденная по методике 4, мощность рассеивания в блоке P , геометрические размеры рамки (высота ячейки $h_p = h/k$, где k – число ячеек, ширина верхнего и боковых ребер Δ_1 , ширина нижнего ребра Δ_2 , ширина контактной окантовки по оси z соседних рамок Δ_k), толщина печатной платы $\Delta_{пл}$, диаметр d_6 и количество n_6 стягивающих винтов. Величины коэффициентов теплопроводности алюминиевых сплавов λ_a и стали λ_{cm} считаются известными. Порядок расчета:

1) находят тепловые проводимости ячейки по координатным осям:

$$\sigma_{ЯХ} = \frac{2\lambda_a \Delta_1 h_p}{b} \quad \sigma_{ЯУ} = \frac{\lambda_a [\Delta_1 h_p + \Delta_2 (h_p - \Delta_{пл})]}{a} \quad (5.28)$$

$$\sigma_{ЯЗ} = \frac{\lambda_a (2b + a) \Delta_k + 0,785 \lambda_{cm} d_6^2 n_6}{h_p} \quad (5.29)$$

2) определяют тепловые проводимости нагретой зоны:

$$\sigma_{3Х} = k\sigma_{ЯХ}, \quad \sigma_{3У} = k\sigma_{ЯУ}, \quad \sigma_{3З} = k\sigma_{ЯЗ} \quad (5.30)$$

3) определяют эквивалентные коэффициенты теплопроводности нагретой зоны:

$$\lambda_X = \frac{\sigma_{3Х} h}{ab}, \quad \lambda_Y = \frac{\sigma_{3У} h}{ab}, \quad \lambda_Z = \frac{\sigma_{3З} h}{ab} \quad (5.30)$$

4) принимают $\lambda_Z = \lambda_0 = const$ для однородного изотропного тела с нормированными относительно $h = h_0$ размерами:

$$a_0 = a \sqrt{\lambda_0 / \lambda_X}, \quad b_0 = b \sqrt{\lambda_0 / \lambda_Y} \quad (5.32)$$

5) по графику рис. 6.13 в зависимости от отношений h_0/a_0 и h_0/b_0 (меньших единицы) определяют коэффициент формы S нагретой зоны.

Примечание: если оба или одно из указанных отношений больше 1, то надо принимать за λ_0 , либо λ_X , либо λ_Y так, чтобы они (отношения a_0/b_0 и a_0/h_0 , либо b_0/a_0 и b_0/h_0) были меньше 1.

6) рассчитывают температуру в центре нагретой зоны:

$$t_0 = t_3 + Ch_0 P / 4 \lambda_0 a_0 b_0, \quad ^\circ C \quad (5.33)$$

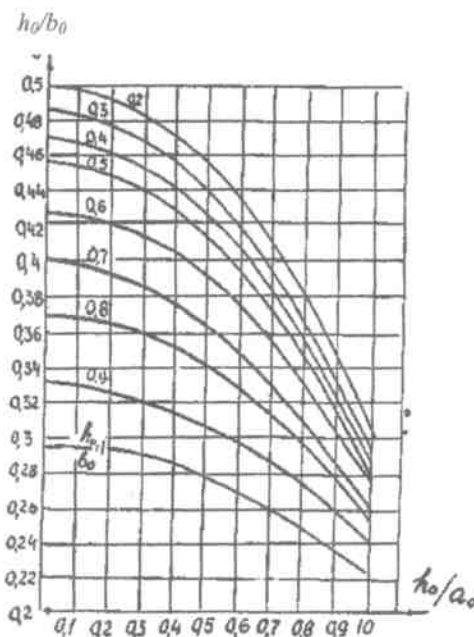


Рис.. 6.13

Задачи расчета теплового режима. Оценочный расчет тепловых режимов конструкций РЭС с естественным воздушным охлаждением и с естественной воздушной вентиляцией.

Важнейшим фактором, определяющим эксплуатационную надежность РЭА, является **тепловой режим**. Основная задача обеспечения нормального теплового режима заключается в создании таких условий, при которых количество тепла, рассеянного в окружающую среду, будет зависеть от мощности тепловыделения блока.

Совокупность устройств, применяемых для обеспечения нормального теплового режима РЭА, называют системой охлаждения (СО), или системой обеспечения теплового режима (СОТР). Эта система выбирается на стадии эскизного проектирования. На этой стадии известна довольно ограниченная информация: потребляемая блоком мощность $P_{номр}$, мощности входных и выходных сигналов $P_{вх}$ и $P_{вых}$, максимальная температура окружающей среды t_0 , примерные габаритные размеры корпуса блока $L_1 \times L_2 \times L_3$, допустимые температуры ЭРЭ (из анализа элементной базы) $t_{i\partial on}$, коэффициент заполнения объема блока k_3 . Эти данные можно использовать для предварительного выбора СОТР. Для этого определяют среднюю плотность теплового потока от корпуса блока q :

$$q = P_t / S_k$$

где $P_t = P_{номр} + P_{вх} - P_{вых}$ — суммарная мощность тепловыделения в блоке;

S_k — условная площадь поверхности теплообмена корпуса блока;

$$S_k = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2) L_3 k_3].$$

Другим показателем является допустимый перегрев наименее теплостойкого элемента $\Delta t = t_{i\partial on \min} - t_0$.

Классификация и эффективность систем охлаждения РЭС. Кондуктивно-конвективные, жидкостно-испарительные системы охлаждения.

На рис. 6.14 приведены графики, характеризующие области целесообразного применения различных способов охлаждения: естественное воздушное (области 1 и 2), принудительное воздушное (области 2, 3 и 4), естественное жидкостное (4), принудительное жидкостное (5, 6 и 7), естественное испарительное (6, 7, 8), принудительное испарительное (7, 8, 9).

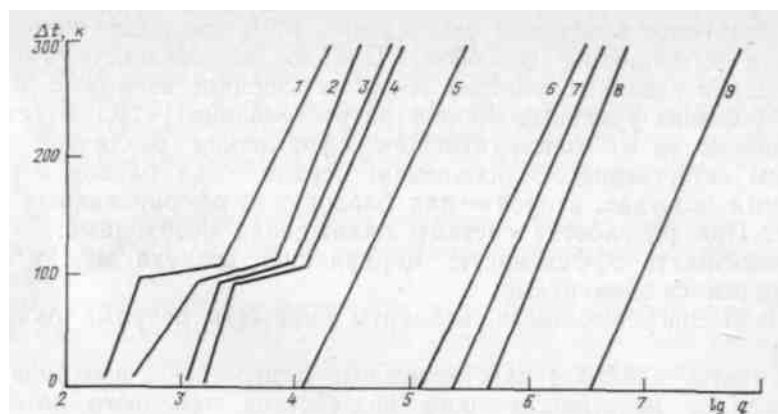


Рис. 6.14. Области применения различных способов охлаждения

Естественное воздушное охлаждение РЭА является наиболее простым и дешевым способом. Однако интенсивность такого охлаждения невелика, поэтому его использование возможно лишь при небольших удельных мощностях рассеивания ($<0,1 \text{ Вт/см}^2$). В зависимости от конструктивного оформления различают две системы естественного охлаждения: первая — для блоков в герметичных кожухах, вторая — для блоков в перфорированных кожухах.

При разработке системы охлаждения необходимо:

- обеспечивать эффективную циркуляцию воздуха между нагревающимися элементами;
- сильно нагревающиеся элементы снабжать ребрами охлаждения;
- элементы, наиболее чувствительные к перегреву, изолировать экранами от непосредственного воздействия теплового потока;
- обеспечивать надежный тепловой контакт между источниками теплоты и поверхностями охлаждения.

Принудительное воздушное охлаждение (ПВО) применяется при значениях q до 1 Вт/см^2 . Различают три основные схемы ПВО: внутреннее перемешивание, наружный обдув, продувку (рис. 6.15).

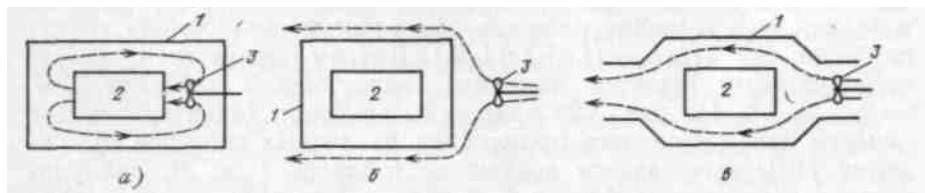


Рис. 6.15. Схемы принудительного воздушного охлаждения:
а – внутреннее перемешивание; б – наружный обдув; в – продувка;
1 – кожух; 2 – платы с элементами; 3 – вентилятор

Естественное жидкостное охлаждение платы с элементами или больших элементов РЭА путем погружения их в жидкость, обладающую более высокой теплоотдачей, применяется редко, так как влечет за собой существенное усложнение конструкции.

Принудительное жидкостное охлаждение используется при высоких удельных мощностях рассеивания. Наибольшее распространение этот способ получил при охлаждении больших элементов (электродов мощных ламп, трансформаторов и т.д.).

Естественное испарительное охлаждение заключается в погружении блока в жидкость, над которой имеется паровой объем, отвод тепла осуществляется в процессе кипения жидкости на охлаждаемой поверхности. Широкое применение получают фитильные испарительные системы и «тепловые трубы». В этих системах для транспортировки жидкости используется капиллярный эффект.

При принудительном испарительном охлаждении жидкость с помощью насоса прокачивается через специальные каналы в охлаждаемых узлах. Этот способ является самым эффективным.

Для охлаждения отдельных элементов РЭА, требующих более низких температур, чем остальные, применяются микрохолодильники. В качестве микрохолодильников применяются вихревые трубки, термоэлектрические батареи, устройства криогенной техники и т.д.

Компоновка и предварительная разработка конструкции блока должна производиться с учетом основного принципа ремонтпригодности – взаимозаменяемости и доступа к сменным узлам.

Тема 7. ПАРАЗИТНЫЕ СВЯЗИ И НАВОДКИ В РЭС

(4 ч. ЛК, 2 ч. СРС)

Общая характеристика паразитных связей в МСБ, ФЯ и блоках аналоговых и цифровых РЭС. Критерии помехоустойчивости цифровых и аналоговых РЭС.

Конструкция электрических соединений в значительной степени определяет качество и надежность конструкции РЭС. Искажение, затухание и задержка сигнала в электрической линии связи (ЛС), а также помехи могут нарушить нормальное функционирование РЭС: вызвать сбой цифрового или изменить параметры аналогового изделия. Кроме того, параметры монтажа влияют на массогабаритные показатели, трудоемкость и стоимость бортовой РЭС. Только операции сборки составляют 50...70% от общей трудоемкости изделий; в результате монтажа чаще всего возникает потребность в использовании драгоценных металлов, а также таких остродефицитных материалов, как вольфрам, ковар и др. Нельзя также забывать, что надежность РЭС во многом определяется числом сварных и паяных соединений, т.е. процессом монтажа.

Развитие методов монтажа оказывает существенное влияние на конструктивное исполнение устройств РЭС; в свою очередь, методы монтажа в значительной мере зависят от назначения РЭС.

Поиск оптимального конструктивно-технологического варианта должен проводиться с учетом элементной базы и техники монтажа. В соответствии с ТЗ на конкретный вид РЭС должны быть последовательно рассмотрены следующие вопросы, связанные с процессами монтажа: общая компоновка, компоновочная совместимость принятой элементной базы и межсоединений; обеспечение защиты от дестабилизирующих факторов, обеспечение технологичности, удобства эксплуатации и ремонта.

К основным этапам конструирования электрических соединений удовлетворяющих требованиям помехоустойчивости, относятся: расчет электрофизических параметров линий связи, построение математических моделей линий связи, оценка помехозащищенности узлов с помощью расчета уровней помех в линиях связи коммутационных плат и межблочных соединениях и сопоставление их с допустимой.

Помехой для РЭС является внешнее или внутреннее воздействие, приводящее к искажению информации во время её хранения, преобразования, обработки или передачи. Существует большое число различного рода помех, которые могут быть классифицированы по видам связей, характеру проявления и пути распространения. По видам связей помехи подразделяются на: гальванические, емкостные, индуктивные. По характеру проявления помехи подразделяются на: импульсные помехи, нарушения синхронизации, нестабильности в изделиях, помехи в цепях связи. По пути распространения помехи подразделяются на: помехи в сигнальных линиях связей и цепях электропитания.

Основные причины, вызывающие помехи в линиях связи РЭС, следующие:

- искажение формы сигнала, обусловленные ёмкостью и индуктивностью линий связи;
- отражения от несогласованных нагрузок и неоднородностей;
- перекрестные наводки из-за наличия паразитной связи между соседними цепями;
- паразитные связи по цепям питания и земли;
- наводки от внешних электрических, магнитных и электромагнитных полей.

Степень влияния каждого из перечисленных факторов на искажение сигналов зависит от характеристик линий связи, параметров логических элементов и сигналов. Для аналоговых РЭС основной формой обеспечения помехоустойчивости является экранирование.

Расчет параметров электрических соединений РЭС по критерию помехоустойчивости.

Электрические параметры и классификация линий связи

Основными электрическими параметрами линий связи (ЛС) являются: погонная ёмкость (C_0) и погонная индуктивность (L_0), производными от них – погонная задержка сигналов в линиях связи (τ_0), и волновое сопротивление (Z_0). Электрические параметры ЛС определяются, как физическими характеристиками: относительной диэлектрической и относительной магнитной проницаемостями, так и конструктивным параметром – коэффициентом формы. Расчётные соотношения для электрических параметров ЛС имеют следующий вид:

$$C_0 = C_{\text{вз0}} = (\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r) / K_\phi = 8,854 \varepsilon_r / K_\phi, [\text{пФ/м}] \quad (7.1)$$

$$L_0 = M_0 = (\mu_0 \cdot \mu_r) / K_\phi = 8,854 \mu_r \cdot K_\phi, [\text{мкГн/м}], \quad (7.2)$$

$$\tau_0 = \sqrt{L_0 \times C_0}, [\text{нс/м}], \quad (7.3)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, [\text{Ом}] \quad (7.4)$$

где C_0 , L_0 , τ_0 , Z_0 – погонные значения ёмкости, индуктивности, задержки и волновое сопротивление одиночных линий связи монтажной платы, $C_{\text{вз0}}$, M_0 – погонные значения взаимной ёмкости и взаимоиндукции в соседних проводниках взаимодействующих линий связи, ε_0 , μ_0 – значения диэлектрической и магнитной проницаемостей воздуха соответственно, ε_r , μ_r – значения относительной диэлектрической и магнитной проницаемостей монтажной платы. Значение ε_r определяется конкретной реализацией монтажной платы. Например, относительная диэлектрическая проницаемость среды между проводниками, расположенными на наружных поверхностях ПП, покрытой лаком: $\varepsilon_r \approx 0,5(\varepsilon_n + \varepsilon_l)$, где ε_n , ε_l – диэлектрическая проницаемость платы и лака соответственно (для стеклотекстолита $\varepsilon_n \approx 5$, для лаков УР-231, ЭП-9114 $\varepsilon_l \approx 4$).

Поскольку проводники плат выполняются из немагнитных материалов, то $\mu_r \approx 1$.

K_ϕ – коэффициент формы линии связи монтажной платы. Значение коэффициента формы определяется вариантом реализации линий связи.

Коэффициент формы линии связи зависит только от её формы, размеров и расположения. В качестве примера, приведём расчётные соотношения K_ϕ для компланарных; линий связи, расположенных одна над другой; коаксиального кабеля и экранированной витой пары.

Значения коэффициентов формы указанных линий связи, поперечные сечения которых изображены на рис.7.1, представлены ниже:

- компланарные линии связи:

$$K_{\phi} \approx \begin{cases} \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{(2W/b + 1)^{1/2} + 1}{(2W/b + 1)^{1/2} - 1} \right], & \text{при } W \leq 2,4b, T \ll W \\ \frac{\pi}{4} \ln [2(2W/b + 1)^{1/2}], & \text{при } W > 2,4b, T \ll W \end{cases}, \quad (7.5)$$

где, W , T , b – ширина, толщина проводника и расстояние между проводниками соответственно;

- проводники расположенные один над другим:

$$K_{\phi} \approx \begin{cases} \frac{1}{\pi} \ln(4b/W + W/2b), & \text{при } W \leq b/2, T \ll W \\ \frac{2}{2W/b + 2,42 - 0,22b/W + (1 - b/2W)^8}, & \text{при } W > b/2, T \ll W \end{cases}, \quad (7.6)$$

– коаксиальный кабель:

$$K_{\phi} = (1/2\pi) \ln(D/d), \quad (7.7)$$

где d , D – диаметр сигнального проводника и кабеля соответственно.

- экранированная витая пара:

$$K_{\phi} = \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{2b}{d} \times \frac{D^2 - b^2}{D^2 + b^2} \right] \quad (7.8)$$

Тип линий связи определяется отношением их физической длины к критической. Критическая длина линий связи равна:

$$l_{кр} = \tau_{фмин} / 2\tau_0, \quad (7.9)$$

где $l_{кр}$ – критическая длина линий связи монтажной платы, $\tau_{фмин}$ – минимальная длительность фронта сигнала передаваемого на монтажной плате.

Электрически короткой называют линию связи, длина которой меньше или равна четверти критической:

$$l_{к} \leq 0,25 \bar{l}_{кр}, \quad (7.10)$$

Электрически длинной – длина которой больше или равна критической:

$$l_{дл} \geq \bar{l}_{кр}, \quad (7.10)$$

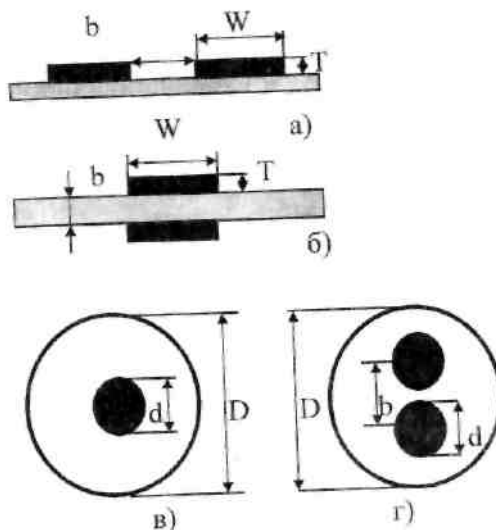


Рис. 7.1. Поперечные сечения линий связи: копланарной (а), одна над другой (б), коаксиальной (в), экранированной витой пары (г).

В зависимости от типа линий связи используются различные методы оценки помехоустойчивости конструкций РЭС.

Расчёт уровней перекрёстных помех при соединении электрически короткими линиями связи

В конструкциях бортовых РЭС с электрически короткими линиями связи наиболее опасными являются перекрёстные помехи, которыми называют сигналы помехи, возникающие в ЛС, из-за наличия сигнала в соседних линиях. Образование перекрестной помехи обусловлено наличием емкостной и индуктивной паразитных связей между линиями связи. Поскольку паразитная связь уменьшается с увеличением расстояния между ЛС, существенными являются наводки от двух соседних линий.

На рис.7.2 показаны взаимодействующие ЛС. В активную цепь входит логический элемент (ЛЭ) – источник (Э1) и ЛЭ – приемник (Э2). В пассивную цепь входят ЛЭ (Э3-Э4), один из которых является управляющим, другой воспринимающим. В связи с этим различают два вида включения ЛЭ в пассивную цепь:

- согласное (Э3 – управляющий, Э4 – воспринимающий),
- встречное (Э3 – воспринимающий, Э4 – управляющий).

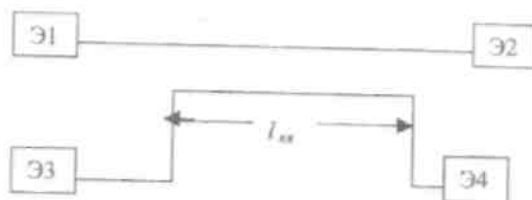


Рис. 7.2. Схема взаимодействующих ЛС.

$l_{вз}$ – длина участка взаимодействия линий связи. Переходные процессы в двух взаимодействующих линиях с идентичными параметрами описываются дифференциальными уравнениями в частных производных:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial i_a}{\partial x} &= -C_0 \frac{\partial U_a}{\partial t} + C_{взо} \frac{\partial U_n}{\partial t} \\ \frac{\partial i_n}{\partial x} &= -C_0 \frac{\partial U_n}{\partial t} + C_{взо} \frac{\partial U_a}{\partial t} \\ \frac{\partial U_a}{\partial x} &= -L_0 \frac{\partial i_a}{\partial t} - M_0 \frac{\partial i_n}{\partial t} \\ \frac{\partial U_n}{\partial x} &= -L_0 \frac{\partial i_n}{\partial t} - M_0 \frac{\partial i_a}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

где i_a, i_n, U_a, U_n – токи и напряжения в активной и пассивной ЛС; $C_{10}, C_{20}, L_{10}, L_{20}$ – погонные значения ёмкости и индуктивности активной и пассивной ЛС (принято, что $C_0 = C_{10} = C_{20}$, $L_0 = L_{10} = L_{20}$); $C_{взо}, M_0$ – погонные значения взаимной ёмкости и взаимоиндукции участка взаимодействия линий связи; x – координата длины ЛС.

Анализ взаимодействующих цепей должен выполняться с учетом граничных условий, которые определяются входными и выходными характеристиками ЛЭ. Решение систем дифференциальных уравнений в частных производных с нелинейными граничными условиями для различных форм сигналов – сложная задача. Кроме того, из-за разброса характеристики ЛЭ проведение точного анализа практически невозможно, поэтому необходимо упростить задачу. С учётом особенностей функционирования электрически коротких линий связи принимаем следующие допущения:

1. Заменяем распределенные электрические параметры ЛС – сосредоточенными, в качестве которых используют интегральные значения электрических параметров активной и пассивной ЛС:

$$C_{вз} = C_{вз0x}/v_3, M = M0x/v_3 \quad (7.12)$$

где C_1, C_2, L_1, L_2 – значения ёмкости и индуктивности активной и пассивной ЛС. $C_{вз}, M$ – значения взаимной ёмкости и взаимоиндукции участка взаимодействия ЛС, l_1, l_2 – длина активной и пассивной ЛС.

На рис. 7.3 показана эквивалентная схема взаимодействующих ЛС, после перехода к сосредоточенным параметрам.

2. Для упрощения граничных условий необходимо линейризовать входные и выходные характеристики ЛЭ. Обоснованием такой линейризации является сравнительно небольшие колебания рабочей точки около своего статического положения из-за низкого уровня перекрёстных помех. Поэтому вместо комплексных входных и выходных сопротивлений ЛЭ на рис.7.3 показаны их активные составляющие ЛЭ ($R_{вх}, R_{вых}$).

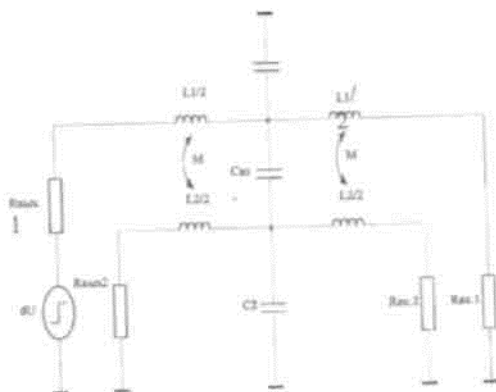


Рис. 7.3.

Взаимодействие активной и пассивной ЛС определяется взаимной ёмкостью и взаимоиндукцией участка взаимодействия линий связи. В зависимости от значений $C_{вз}$ и M взаимодействие может быть ёмкостным, индуктивным и комплексным.

При ёмкостном взаимодействии $U_C \gg U_L$, где U_C, U_L – ёмкостная и индуктивная составляющие перекрёстной помехи. Такое взаимодействие характерно для низкоскоростных ИС, преимущественно выполненных по КМОП технологии.

При индуктивном взаимодействии $U_L \gg U_C$. Этот тип взаимодействия распространяется на высокоскоростные ИС, выполненные по ЭСЛ технологии.

При комплексном взаимодействии $U_n = U_C \pm U_L$. Такое взаимодействие характерно для ИС, выполненных по ТТЛШ технологии.

Рассмотрим подробнее различные типы взаимодействия ЛС.

Ёмкостная составляющая помехи.

Эквивалентная схема взаимодействующих линий связи, для случая ёмкостного взаимодействия представлена на рис. 7.4.

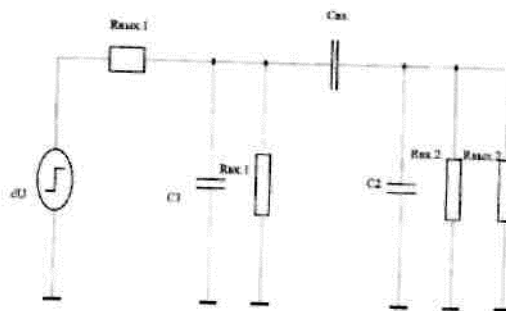


Рис. 7.4. Эквивалентная схема при емкостном взаимодействии ЛС.

Активная линия представлена: источником напряжения величиной $dU = U^1 - U^0$, выходным сопротивлением $R_{вых1}$, ёмкостью линии C_1 и нагрузкой $R_{вх1}$. Пассивная линия представлена: ёмкостью линии C_2 и сопротивлениями $R_{вых2}$, $R_{вх2}$. Емкостное взаимодействие ЛС определяет взаимная ёмкость $C_{вз}$.

Исходным уравнением, описывающим взаимодействующие ЛС, является второе уравнение системы 7.11:

$$\frac{\partial i_n}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial U_n}{\partial t} + C_{вз} \frac{\partial U_a}{\partial t} \quad (7.13)$$

Учитывая, что изменения напряжения в пассивной линии не происходит, первое слагаемое уравнения равно нулю. Принятые допущения 1 и 2 позволяют перейти к интегральной форме исходного уравнения. Амплитудное значение емкостной составляющей перекрёстной помехи равно:

$$U_{ПС} = \frac{dU \cdot C_{вз} \cdot R_{вых}(1)}{\tau_{фмин}} \quad (7.14)$$

где $\tau_{фмин}$ – минимальная длительность фронта перепада напряжения

для ИС КМОП и ЭСЛ: $\tau_{фмин} = \tau_{01} = \tau_{10}$, для ИС ТТЛШ $\tau_{фмин} = \tau_{10}$ (7.15)

$R_{вых}(1)$ – выходное сопротивление ИС в состоянии логической 1.

Индуктивная составляющая помехи

Эквивалентная схема взаимодействующих линий связи, для случая индуктивной составляющей помехи представлена на рис. 7.5.

Активная линия представлена: источником тока величиной $dI = I^0 - I^1$ индуктивностью L_1 . Пассивная линия представлена: ёмкостью линии L_2 и сопротивлениями $R_{вых2}$, $R_{вх2}$. Индуктивное взаимодействие ЛС определяется взаимоиндукцией M .

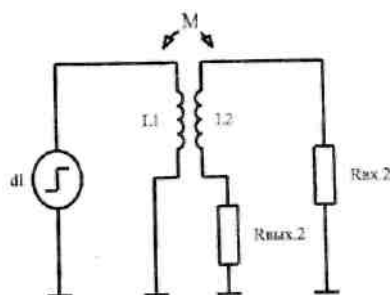


Рис.7.5. Эквивалентная схема при индуктивном взаимодействии ЛС.

Исходным уравнением, описывающим взаимодействующие ЛС, является четвёртое уравнение системы 7.11:

$$\frac{\partial U_n}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial i_n}{\partial t} - M_0 \frac{\partial i_a}{\partial t} \quad (7.16)$$

Учитывая, что изменения тока в пассивной линии не происходит, первое слагаемое уравнения равно нулю. Принятые допущения 1 и 2 позволяют перейти к интегральной форме исходного уравнения. Амплитудное значение индуктивной составляющей перекрёстной помехи равно:

$$U_{\text{ПЛ}} = -M \frac{dI}{\tau_{\text{фмин}}} \quad (7.17)$$

где $\tau_{\text{фмин}}$ – минимальная длительность фронта перепада тока, которое численно равно минимальной длительности фронта перепада напряжения, в силу чисто активного характера сопротивлений $R_{\text{вых}}$, $R_{\text{вх}}$.

Комплексное взаимодействие ЛС.

В большинстве практических случаев взаимодействия ЛС носит комплексный характер, при этом амплитуда перекрёстной помехи определяется следующим образом:

$$U_{\text{П}} = U_{\text{ПС}} \pm U_{\text{ПЛ}} = \frac{dU \times C_{\text{вз}} \times R_{\text{вых}}(1)}{\tau_{\text{фмин}}} \pm \frac{dI \times M}{\tau_{\text{фмин}}} \quad (7.18)$$

где $U_{\text{ПС}} + U_{\text{ПЛ}}$ – при прямом включении взаимодействующих ЛС, а $U_{\text{ПС}} - U_{\text{ПЛ}}$ – при встречном включении взаимодействующих ЛС.

В табл. 7.1 приведены средние значения параметров ИС, необходимые для расчёта значений перекрёстной помехи.

Таблица 7.1.

Технология	$\tau_{01}, \text{нс}$	$\tau_{10}, \text{нс}$	$R_{\text{вых}}(1), \text{Ом}$	$R_{\text{вых}}(0), \text{Ом}$	$R_{\text{вх}}, \text{кОм}$	$C_{\text{вых}}, \text{пф}$	$C_{\text{вх}}, \text{мф}$	$dI, \text{В}$	$U, \text{В}$	$U_{\text{пом}}, \text{В}$
ТТЛШ	7,4	2,8	60	25	40	5	5	15	2,6	0.4
КМОП	40	40	300	300	1000	10	5	2	4.0	09
ЭСЛ	0,7	0,7	7	7	1	13	3	25	0,7	0 12
GaAs	0,2	0,2	12	12	42	1	1	20	1,3	0,08

Конструктивные методы уменьшения паразитных связей. Электростатическое и электромагнитное экранирование, выбор материалов экранов и расчет эффективности экранирования. Схемотехнические и конструктивные методы подавления кондуктивных наводок в цепях РЭС.

#Экранирование представляет собой конструктивный способ ЭМС. В основе экранирования лежит применение экранов, разделяющих источник и приемник помехи. Эффективность применения экрана оценивают эффективностью экранирования:

$$\Theta = \frac{U}{U'} = \frac{J}{J'} = \frac{E}{E'} = \frac{H}{H'} [\partial B],$$

где U, J, E, H – напряжение, напряженность электрического поля, ток, напряженность магнитного поля до использования экрана,

U', J', E', H' – после использования экрана.

Классификация экранов.

Конструктивно экран представляет собой некоторую поверхность. Материал экрана должен обладать высокой электронной проводимостью.

На поверхность экрана падает электромагнитная волна.

Если расстояние между источником излучения и экраном мало по сравнению с длиной волны, то на поверхности экрана присутствует электрическая или магнитная составляющая поля. В этом случае отдельно рассматривается передача помехи через электрическую составляющую (емкость) или магнитную составляющую поля (индуктивность).

Таким образом, экраны можно разделить на:

1. Электрические (электростатические).
2. Электромагнитные.
3. Магнитостатические.

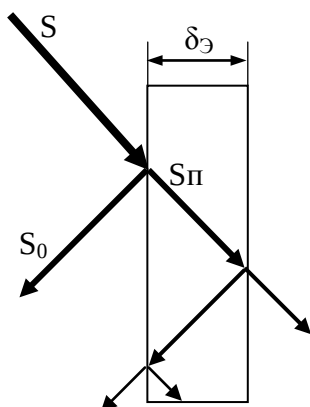
Электростатические экраны предназначены для подавления помехи через электрическую составляющую поля.

Электромагнитные экраны предназначены для подавления связанной с магнитной составляющей ЭМП.

Магнитостатические экраны предназначены для защиты приемника наводки от постоянных или низкочастотных магнитных полей.

В случае, когда источник излучения находится на расстоянии длины волны от экрана, на поверхность экрана падает плоский фронт волны. Для подавления плоского фронта используется магнитостатический экран.

Основы теории работы экрана.



$$S = S_0 + S_n$$

S_n – потери на поглощение.

S_0 – потери на отражение

Потери на отражение зависят от того, насколько волновое сопротивление среды, где распространяется волна, согласовано с волновым сопротивлением экрана.

$$Z_{\text{ср}} = \frac{E_{\text{пад}}}{H_{\text{пад}}} \approx 377 \text{ Ом} - \text{для плоской волны.}$$

$$Z_{\text{экр}} = Z_{\text{экр}}(f, \mu, \rho), \text{ где}$$

f – частота ЭМП.

μ – магнитная проницаемость материала,

ρ – удельное электрическое сопротивление материала.

$$Z_{\text{э}} = \frac{\sqrt{2\pi \cdot \mu \cdot f \cdot \rho}}{(1 - e^{-\frac{\delta_{\text{э}}}{\delta}})}, \text{ где}$$

δ – эквивалентная глубина проникновения (толщина скин-слоя уменьшается с увеличением частоты).

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad \delta_{\text{э}} > \delta.$$

На низких частотах волновое сопротивление экрана мало и хорошо согласуется с волновым сопротивлением среды. С повышением частоты и ростом волнового сопротивления экрана происходит рассогласование волновых сопротивлений экрана и среды, поэтому в области низких частот преобладают потери на поглощение, а в области высоких – потери на отражение.

Если рассматривать электрическую и магнитную составляющую поля, то

- для магнитной составляющей на низких частотах:
 $Z_{\text{э}} \approx Z_{\text{ср}}$; потери на отражение малы, преобладают потери на поглощение.
- для электрической составляющей на НЧ:
 $Z_{\text{ср}} \gg Z_{\text{э}}$; преобладают потери на отражение.
- для магнитной составляющей на ВЧ:
 $Z_{\text{э}} \gg Z_{\text{ср}}$; преобладают потери на отражение.
- для электрической составляющей на ВЧ:
 $Z_{\text{э}} \approx Z_{\text{ср}}$; преобладают потери на поглощение.

Потери на поглощение определяются электрическими свойствами материала (удельной электропроводностью).

Электростатический экран.

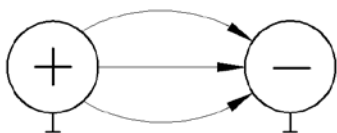


Рис 7.6.

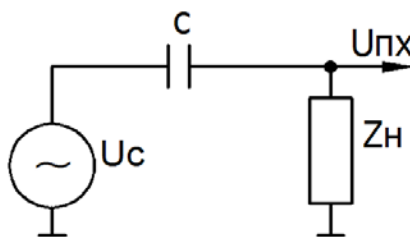
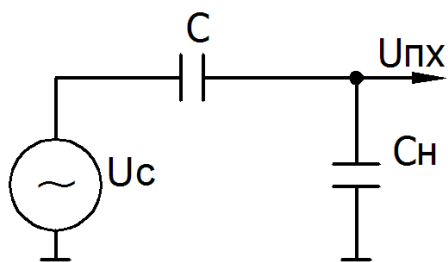


Рис 7.7.

На Рис 7.7. С – емкостные связи источника и приемника.

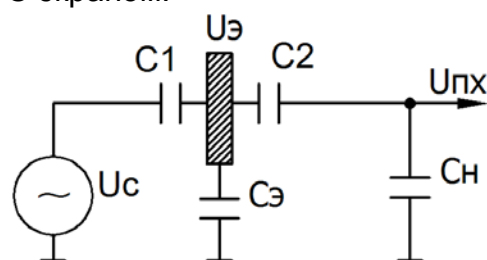
Z_H – эквивалентное сопротивление приемника помехи.

При отсутствии экрана:



$$U_{ПХ} = \frac{C}{C + C_H} \cdot U_c$$

С экраном:



$$U_э = U_c \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_э}$$

$$U_{ПХ} = U_э \cdot \frac{C_2}{C_2 + C_H}$$

Введение экрана приводит к появлению емкостей C_1 , C_2 , $C_э$. Передача помехи происходит через C_1 на экран и далее, с экрана через C_2 на приемник.

Если $C_э \gg C_1$, то получим $U_э = U_c \cdot \frac{C_1}{C_э} \rightarrow 0 \Rightarrow U_{ПХ} \rightarrow 0$.

Для подавления помехи нужно увеличивать собственную ёмкость экрана. Для того чтобы сделать емкость экрана бесконечно большой, применяется заземление. Тогда помеха передается на приемник через C' :

$$U_{ПХ} = U_c \cdot \frac{C'}{C' + C_H}$$

Если $C_H \gg C$ и $C_H \gg C'$, то эффективность экранирования можно вычислить по следующей формуле:

$$\mathfrak{E} = \frac{U_{ПХ}}{U'_{ПХ}} = \frac{C}{C'}$$

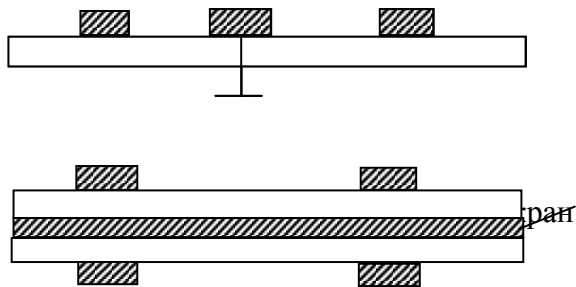
Чем больше размеры экрана, тем меньше C' .

Конструктивно электростатические экраны представляют собой пластины из токопроводящего материала между источником и приемником. Пластина должна быть заземлена. Её толщина выбирается из конструктивных соображений и не отражается на эффективности экранирования.

В качестве экрана могут быть использованы фольгированные диэлектрики или диэлектрики, покрытые токопроводящей краской.

Примеры экранов на ПП.

Э



Электромагнитный экран.

#Электромагнитный экран представляет собой замкнутую для наведенных на нем токов поверхность.

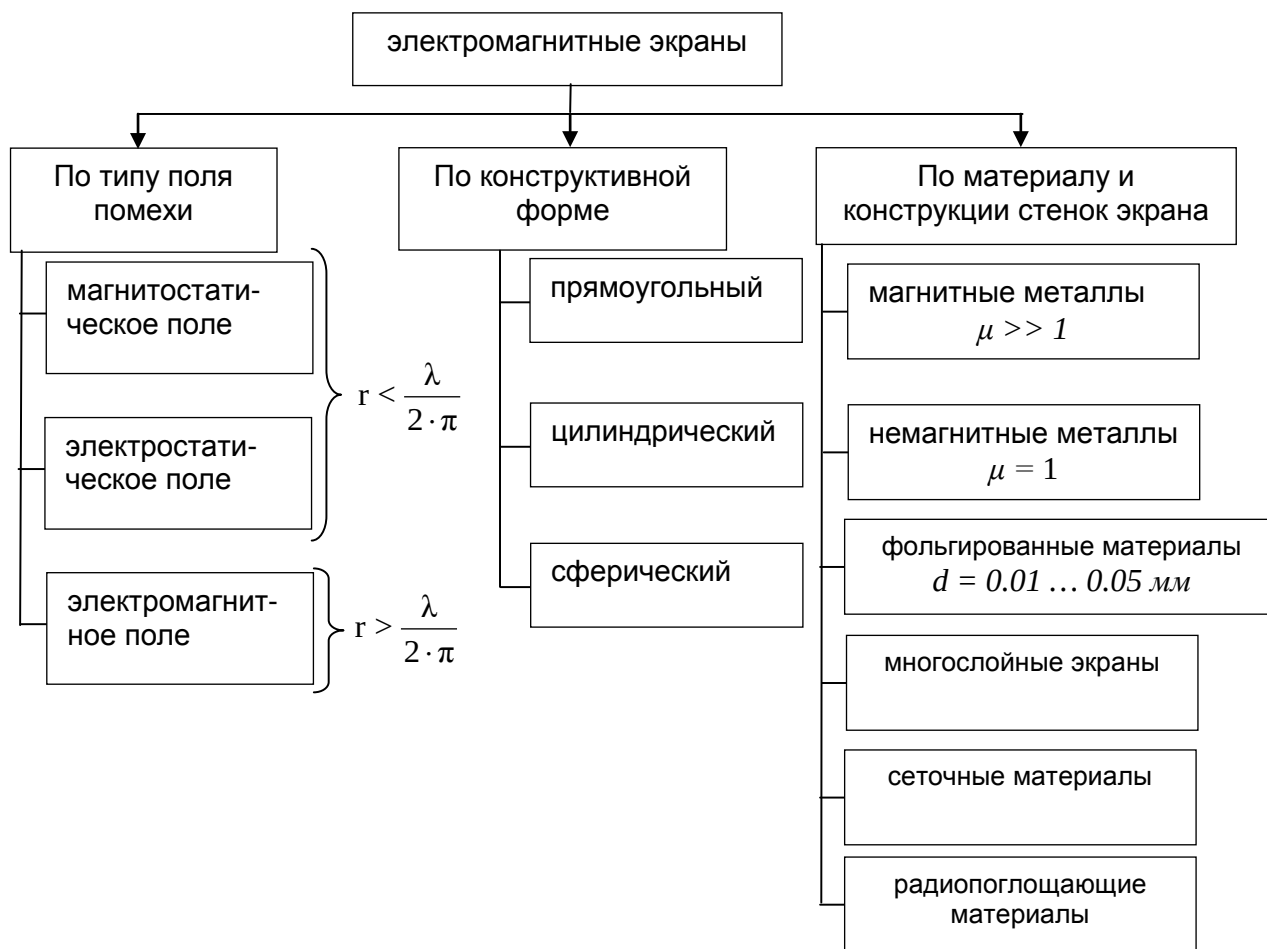
При этом условии для подавления магнитной составляющей действует принцип вытеснения поля за пределы экрана.

Для реализации принципа вытеснения экран должен быть замкнут для токов наводимых на нем.

При необходимости выполнить разрезы или отверстия на экране нужно учитывать, что они должны пересекать меньшее количество силовых линий тока.

Электромагнитный экран всегда заземляется, т.к. в этом случае он так же выполняет функции электростатического экрана.

Классификация электромагнитных экранов.



Выбор материала экрана.

В силу того, что $\delta_3 > \delta \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$, на низких частотах толщина стенок должна быть большой. С увеличением частоты толщина стенок уменьшается. Например:

На 100 Гц $\delta = 6,7$ мм (медь); $\delta = 12,4$ мм (латунь); $\delta = 8,8$ мм (сплавы алюминия).

Для уменьшения толщины стенок применяются ферромагнитные материалы с высокой магнитной проницаемостью:

На 100 Гц $\delta = 1,5$ мм (сталь), $\delta = 0,38$ мм (пермаллой).

Т.о. на НЧ используются, как правило, ферромагнитные материалы.

На ВЧ(100 МГц):

$\delta = 0,067$ мм (медь); $\delta = 0,088$ мм (сплавы алюминия),

Т.о. на ВЧ можно использовать парамагнитные материалы.

Эффективность ЭМ экрана:

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot \mu \cdot \sigma \cdot D \cdot \delta_3}{2 \cdot m} \right)^2} \quad \text{на НЧ;}$$

$$\Xi = e^{\frac{\delta_3}{\delta}} \cdot \left(0.5 + \frac{D}{2.8 \cdot m \cdot \mu \cdot \delta} \right) \quad \text{на ВЧ.}$$

σ – удельная электропроводность материала экрана (См/м);

D – эквивалентный диаметр экрана, т.е. это диаметр цилиндра, длина окружности которого равна периметру сечения экрана;

m – параметр, характеризующий форму экрана;

($m = 1$ – для прямоугольной формы, $m = 2$ для цилиндрической формы, $m = 3$ для сферической формы).

Тема 8. КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ РЭС

(2 ч. ЛК, 1 ч. СРС)

Понятие о контроле качества изделия. Виды технического контроля РЭС.

Под качеством ЭА понимают совокупность свойств, определяющих способность изделий удовлетворять заданным требованиям потребителя. Качество ЭА обуславливает их конструктивные, технологические, экономические, эргономические и другие параметры. Качество как свойство закладывается в процессе разработки и изготовления ЭА, а объективно оценивается в процессе эксплуатации.

Одним из методов оценки качества служат теоретические расчеты. Однако расчетные оценки нуждаются в экспериментальном подтверждении, так как исходные данные и модели являются приближенными. Поэтому существенный объем информации о качестве ЭА получают путем контроля их параметров и проведения испытаний на всех этапах, начиная с разработки нормативно-технической документации (НТД) и кончая анализом рекламаций и заключений потребителя о качестве готовых изделий.

Согласно Государственному стандарту (ЕСТПП. Виды процессов контроля) устанавливаются следующие виды технологических процессов технологического контроля:

- по унификации (единичный, унифицированный);
- по освоению процесса (рабочий, перспективный);
- по степени регламентации действий, устанавливаемых в документации (маршрутный, операционный, маршрутно-операционный).

Единичный процесс контроля применяют для изделий одного наименования, типоразмера и исполнения, а также для технологических процессов одного содержания независимо от типа производства.

Унифицированный процесс контроля в зависимости от общности конструктивных и технологических контролируемых признаков объектов бывает типовым и унифицированным.

Унифицированный типовой процесс контроля используют: в качестве рабочего процесса контроля при наличии в документации описания всех операций; как информационную основу при разработке рабочего процесса контроля; как базу для разработки стандартов на типовые процессы контроля.

Унифицированный групповой процесс контроля применяют: в качестве рабочего процесса контроля при наличии в документации описания всех операций; как информационную основу при разработке группового рабочего процесса контроля.

Рабочий процесс контроля используется для конкретных объектов в соответствии с требованиями рабочей технической документации.

Перспективный процесс контроля разрабатывается как информационная основа для рабочих процессов контроля при переоснащении производства и рассчитан на применение более совершенных методов контроля, более производительных и экономически эффективных средств контроля и на изменение принципов организации технического контроля.

Применение маршрутного, операционного или маршрутно-операционного процесса контроля устанавливается в отраслевых стандартах или в стандартах предприятия.

Государственный стандарт устанавливает следующие объекты контроля: материал, полуфабрикат, заготовка, деталь, сборочная единица, комплекс, комплект, технологический процесс.

При контроле материала, полуфабриката, заготовки и детали в состав контролируемых объектов включены: марка материала (кроме объекта деталь), геометрические и физико-химические параметры, внешние и внутренние дефекты, клейма (кроме объекта материал). Для сборочной единицы, комплекса и комплекта предусмотрен контроль геометрических и функциональных параметров, внешних и внутренних дефектов и клейм, а для технологического процесса – контроль качественных и количественных характеристик. Следует также подвергать проверке упаковку, комплектность, консервацию и сопроводительную документацию, если это предусмотрено ТУ.

При контроле технологических процессов допускается проверка параметров вспомогательных материалов, средств технологического оснащения, в том числе средств контроля, технологической дисциплины, точности и стабильности ТП, характеристики внешних условий. По усмотрению разработчика допускается контролировать другие признаки (эргономические, эстетические и т.д.).

Процессы контроля должны обеспечивать решение задач, установленных для входного, операционного и приемочного контроля, и охватывать весь ТП и его результаты, предотвращать попадание дефектных заготовок и изделий на последующие этапы изготовления.

При входном контроле решают задачи проверки соответствия качества материалов, полуфабрикатов, заготовок, комплектующих деталей и сборочных единиц требованиям, установленным в стандартах, ТУ, договорах о поставках. Входной контроль на предприятии-потребителе осуществляет специальное подразделение.

При операционном контроле решают задачи проверки соответствия контролируемых признаков деталей и сборочных единиц в процессе изготовления предъявляемым к ним требованиям, а также выявляют количественные и качественные характеристики ТП. Операционный контроль осуществляет исполнитель операции (рабочий, бригадир, испытатель), руководитель участка (мастер, старший мастер), контролер или мастер отдела технического контроля.

При приемочном контроле решают задачи проверки соответствия качества готовых изделий требованиям, установленным в нормативно-технической документации, в том числе комплектность, упаковку и консервацию изделий, ее пригодность к транспортированию и использованию. Приемочный контроль осуществляют контролер, мастер ОТК и (при необходимости) представитель заказчика.

Процессы контроля подразделяют на четыре категории, применяемые по усмотрению предприятия. По полноте охвата контролером любая категория контроля подразделяется

на сплошной и выборочный контроль, а по связи с объектом контроля – на непрерывный, периодический и летучий.

Сплошной контроль применяют в условиях особо высоких требований к уровню качества изделий, у которых абсолютно недопустим пропуск дефектов в дальнейшее производство или эксплуатацию.

Выборочный контроль применяют для изделий, когда их количество достаточно для получения выборок с установленным риском поставщика и потребителя, при большой трудоемкости контроля, а также при контроле, связанном с разрушением изделий, и на операциях, выполняемых на автоматических и поточных линиях. Как правило, пользуются статистическими методами контроля.

Непрерывный контроль применяют для проверки ТП в случаях их нестабильности и необходимости постоянного обеспечения определенных количественных и качественных характеристик. Как правило, используют автоматические или полуавтоматические средства контроля.

Периодический контроль (сплошной или выборочный) применяют для проверки изделий и ТП при установившемся производстве и стабильных ТП.

Летучий контроль (только выборочный) применяют для малоответственных изделий и ТП.

Государственный стандарт (ЕСТПП Правила разработки процессов контроля) устанавливает основные положения и этапы разработки процессов и операций технического контроля, а также задачи на этапах их разработки при технологической подготовке производства.

Технический контроль (ТК) является неотъемлемой составной частью ТП изготовления изделия и разрабатывается в виде процесса ТК, операции ТК. Под техническим контролем понимается совокупность технологических операций ТК, выполняемых при изготовлении изделия и его составной части. Процессы ТК разрабатываются для входного контроля материалов, заготовок, полуфабрикатов, а также комплектующих деталей и сборочных единиц; операционного контроля деталей и сборочных единиц; приемочного контроля изделий.

Операции ТК разрабатывают для входного контроля несложных объектов, операционного контроля ТП или обрабатываемой заготовки после завершения определенной технологической операции. Процессы (операции) ТК разрабатывают вместе с ТП изготовления изделия с обеспечением необходимой взаимосвязи и взаимодействия между ними. Уровень автоматизации и механизации процессов (операций) ТК должен отвечать требованиям ТП изготовления изделия, условиям и типу производства.

При разработке процессов (операций) ТК необходимо обеспечить единство конструкторских, технологических и измерительных баз. Операции ТК должны предусматривать получение информации для регулирования ТП, а также обеспечивать предупреждение с заданной вероятностью пропуска дефектных материалов, заготовок, полуфабрикатов, деталей и сборочных единиц для последующего изготовления изделия. Процессы (операции) ТК должны соответствовать требованиям техники безопасности и промышленной санитарии, а также Государственным стандартам и согласовываться с отделом технического контроля.

Порядок разработки процессов (операций) ТК включает 17 этапов:

- 1) анализ задания на разработку процесса (операции) ТК;
- 2) классификация объектов контроля;
- 3) выбор объектов контроля;
- 4) группирование объектов контроля по метрологическим признакам;
- 5) группирование объектов контроля;

- 6) количественная оценка групп изделий (объектов контроля);
- 7) выбор действующего типового, группового процесса ТК или поиск аналога единичного процесса ТК;
- 8) составление технологического маршрута процесса ТК;
- 9) выбор контролируемых параметров;
- 10) разработка технологических операций ТК;
- 11) определение объема контроля;
- 12) выбор схем контроля;
- 13) выбор метода контроля;
- 14) выбор средств контроля;
- 15) расчет точности, производительности и экономической эффективности вариантов процессов (операций) ТК;
- 16) оформление документации на процессы (операции) ТК;
- 17) разработка документации результатов контроля.

Задачи, решаемые на каждом этапе, и основные документы, обеспечивающие решение этих задач, изложены в ГОСТе. Необходимость каждого этапа, состав задач и последовательность их решения определяются разработчиком процесса ТК в зависимости от условий производства или устанавливаются стандартами предприятия.

Нормативно-технические документы на ТК в общем случае включают стандарты «Технический контроль. Термины и определения», «Средства контроля. Термины и определения», «Правила разработки процессов (операций) технического контроля», «Правила выбора средств контроля»; классификатор объектов контроля; классификатор технологических операций технического контроля; методику выбора объектов контроля; методику размещения постов контроля по технологическому процессу изготовления и ремонта изделий; методику выбора контролируемых параметров; методику выбора схемы контроля; методику выбора метода контроля; стандарты типовых процессов (операций) технического контроля.

Классификация и назначение видов испытаний РЭС. Технологические, климатические, механические испытания, испытания на надежность. Понятие об автономных и комплексных испытаниях бортового радиооборудования.

Испытания ЭА представляют собой экспериментальное определение при различных воздействиях количественных и качественных характеристик изделий при их функционировании. К основным целям испытания, общим для всех видов ЭА, можно отнести: выбор оптимальных конструктивно-технологических решений при создании новых изделий; доводку изделий до необходимого уровня качества; объективную оценку качества изделий.

Испытания служат эффективным средством повышения качества, так как позволяют выявить: недостатки конструкции и технологии изготовления ЭА, приводящие к срыву выполнения заданных функций в условиях эксплуатации; отклонения от выбранной конструкции или принятой технологии, допущенные в производстве; скрытые случайные дефекты материалов и элементов конструкции, не поддающиеся обнаружению существующими методами технического контроля; резервы повышения качества и надежности разрабатываемого конструктивно-технологического варианта изделия. По результатам испытаний изделий в производстве разработчик ЭА устанавливает причины снижения качества. Если эти причины установить не удастся, совершенствуют методы и средства контроля изделий и ТП их изготовления.

Для повышения качества выпускаемой ЭА на конечных операциях ТП их изготовления проводят предварительные испытания, позволяющие выявить изделия со скрытыми дефектами. Режимы этих испытаний выбирают такими, чтобы они обеспечивали отказы

изделий, содержащих скрытые дефекты, и в то же время не вырабатывали ресурса тех изделий, которые не содержат дефектов, вызывающих при эксплуатации отказы. Эти испытания часто называют технологическими тренировками (термотоковая тренировка, электротренировка, тренировка термоциклами и др.).

Программа и методы проведения испытаний определяются конкретным видом и назначением ЭА, а также условиями эксплуатации. Для контроля качества и приемки изделий устанавливают основные категории контрольных испытаний, оговоренные в ТУ: *приемо-сдаточные, периодические и типовые*.

Каждая категория испытаний может включать несколько видов испытаний (электрические, механические, климатические, на надежность и др.) и видов контроля (визуальный, инструментальный и др.). В зависимости от особенностей эксплуатации и назначения изделий, а также специфики их производства некоторые виды испытаний выделяют в отдельные категории испытаний (на надежность – безотказность, долговечность, сохраняемость и др.). Виды испытаний и контроля, последовательность проведения, проверяемые параметры и их значения устанавливаются в ТУ (стандартах, программах, методиках и др.).

Во время испытаний применяют сплошной или выборочный контроль по ТУ и плану контроля. Результаты испытаний считаются отрицательными, если обнаружено несоответствие изделия хотя бы одному требованию ТУ для проводимой категории испытаний. Применяемые средства испытаний, измерения и контроля, а также методики измерений должны соответствовать требованиям метрологического обеспечения. Запрещается использовать средства испытаний, не прошедших метрологическую аттестацию.

В соответствии с Государственным стандартом механические и климатические испытания проводят с целью проверки соответствия изделий ЭА требованиям, установленным в ТЗ, стандартах и ТУ на изделия конкретных классов и типов. Испытаниям подвергается ЭА или отдельные ее части, число которых устанавливают в ТУ на изделия и в программе испытаний. Перечень испытаний, рекомендуемых при разработке, освоении и серийном производстве, приведен в табл. 8.1. Виды механических испытаний обозначены номерами 101–114, климатических – 201–220, 301 и 302, испытания на соответствие конструктивно-технологическим требованиям – 401–412.

Все испытания проводят в нормальных климатических условиях, которые характеризуются следующими значениями параметров:

- температура воздуха 15...35 °С;
- относительная влажность воздуха 45... 80 %;
- атмосферное давление 84... 106 кПа (630... 800 мм рт. ст.).

Испытания последовательно включают в себя начальную стабилизацию (если требуется); начальную проверку и измерения (если требуется); выдержку; конечную стабилизацию (если требуется); заключительные проверки и измерения (если требуется).

Таблица 8.1.

Перечень рекомендуемых испытаний.

Номер испытания	Вид испытания	Необходимость проведения испытаний	
		На опытных образцах (опытных партиях), образцах из установочной серии, а также на изделиях серийного производства в случае изменения их конструкции, технологии или материалов	На изделиях серийного производства, проверяемых периодически, кроме изделия серийного производства в случае изменения их конструкции, технологии или материалов
1	2	3	4
100	Испытания по определению резонансных частот конструкции	+	—
101	Испытания на проверку отсутствия резонансных частот конструкции в заданном диапазоне	+	—
102	Испытание на устойчивость при воздействии синусоидальной или широкополосной случайной вибрации (испытание на виброустойчивость)	+	Н
103	Испытание на прочность при воздействии синусоидальной или широкополосной случайной вибрации длительное (испытание на вибропрочность длительное)	+	Н
103	Испытание на прочность при воздействии синусоидальной вибрации кратковременное (испытание на вибропрочность кратковременное)	+	Н
104	Испытание на прочность при воздействии механических ударов многократного действия (испытание на ударную прочность)	+	Н
105	Испытание на устойчивость при воздействии механических ударов многократного действия (испытание на ударную устойчивость)	+	Н
106	Испытание на воздействие механических ударов одиночного действия (испытание на воздействие одиночных ударов)	+	Н
107	Испытание на воздействие линейного ускорения	+	—
108	Испытание на воздействие акустического шума	+	—
109	Испытание выводов на воздействие растягивающей силы	+	Н
110	Испытание гибких проволочных и ленточных выводов на изгиб	+	Н
111	Испытание гибких лепестковых выводов на изгиб	+	Н
112	Испытание гибких проволочных выводов на скручивание	+	Н
113	Испытание резьбовых выводов на воздействие крутящего момента	+	Н

114	Испытание на воздействие синусоидальной вибрации с повышенным значением амплитуды ускорения	+	—
201	Испытание на воздействие повышенной рабочей температуры среды	+	+
202	Испытание на воздействие повышенной предельной температуры среды	+	-
203	Испытание на воздействие пониженной рабочей температуры среды	+	+
204	Испытание на воздействие пониженной предельной температуры среды	+	-
205	Испытание на воздействие изменения температуры среды	+	Н
206	Испытание на воздействие инея и росы	+	-
207	Испытание на воздействие повышенной влажности воздуха, длительное или ускоренное	+	Н
208	Испытание на воздействие повышенной влажности воздуха кратковременное	Н	Н
209	Испытание на воздействие атмосферного пониженного давления	+	Н
210	Испытание на воздействие повышенного давления	+	Н
211	Испытание на воздействие солнечного излучения	+	—
212	Испытание на воздействие динамической пыли (песка)	+	—
213	Испытание на воздействие статической пыли (песка)	+	—
214	Испытание на воздействие плесневых грибов	+	—
215	Испытание на воздействие соляного тумана	+	—
216	Испытание на воздействие статического гидравлического давления	+	Н
217	Испытание на водонепроницаемость	+	Н
218	Испытание на воздействие дождя	+	—
219	Испытание на каплезащищенность	+	—
220	Испытание на водозащищенность	+	Н
301	Испытание на воздействие агрессивных сред (сернистого газа или сероводорода, озона)	+	—
302	Испытание на воздействие сред заполнения	Н	—
401	Испытание на герметичность	+	Н
402	Испытание на способность к пайке	+	Н
403	Испытание на теплостойкость при пайке	+	Н
404	Проверка соответствия габаритным, установочным и присоединительным размерам	+	+
405	Проверка внешнего вида	+	+
406	Проверка массы	+	+
407	Контроль качества маркировки	+	+
408	Испытание упаковки на прочность	+	+
409	Испытание на пожарную безопасность	Н**	—
410	Испытание на взрывозащищенность	Н**	—

411	Испытание на воздействие очищающих растворителей	+	—
412	Испытание на паяемость, растворение металлизации и теплостойкость при пайке изделий для поверхностного монтажа	+	Н

Примечание:

+ — испытания проводят, если соответствующие требования установлены в ПИ и ТУ на изделие;

— — испытания не проводят;

Н — испытания проводят, если это предусмотрено в ПИ и ТУ на изделие;

* — испытания проводят один раз при разработке изделия, а также при изменении конструкции, если это изменение влияет на значение резонансных частот;

** — испытание проводят один раз при разработке изделий, а также при изменении конструкции, технологии или материалов, если эти изменения влияют на характеристики изделий, определяющие их стойкость к данному воздействию (условия не относятся к испытаниям на воздействие сернистого газа или сероводорода).

Для климатических испытаний допустимые отклонения воздействующих климатических факторов не должны превышать значений, указанных в таблице 8.2, если в НТД не указаны иные допускаемые отклонения, обусловленные спецификой эксплуатации изделий.

Таблица 8.2.

Допустимое отклонение воздействующих климатических факторов.

Воздействующий фактор	Допустимое отклонение
Температура, °С:	
-200...-85	±5°С
-85...+100	±2°С
100...200	±5°С
свыше 200	±10 °С
Скорость изменения температуры окружающей среды, °С/мин:	
1...5	±20 %
5...10	±50 %
Относительная влажность по ТУ	±3%
Пониженное давление:	
выше $1,33 \cdot 10^2$ Па (1 мм рт.ст.)	±5% или $1,33 \cdot 10^2$ Па*
$1,33 \cdot 10^2$... $1,33$ Па (10^{-2} мм рт.ст.)	±60 %
ниже $1,33$ Па	±30 %
Повышенное избыточное давление по ТУ, Па	±20%
Солнечное излучение:	
Интегральная плотность потока по ТУ, Вт • м ⁻²	±10%
Плотность потока ультрафиолетовой части спектра	

Тема 9. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЭС

(8 ч. ЛК, 4 ч. СРС).

Основные характеристики и параметры надежности.

#Надежность – свойство ЭА выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, при соблюдении режимов эксплуатации, правил технического обслуживания, хранения и транспортирования.

#Ресурс – продолжительность работы ЭА до предельного состояния, установленного в нормативно-технической документации.

#Исправность – это состояние РЭС, при котором оно соответствует всем требованиям установленным в технической документации.

#Работоспособность – это состояние РЭС, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения параметров в пределах установленных технической документацией.

Случайное событие, приводящее к полной или частичной утрате работоспособности ЭА, называется **#отказом**.

Исправность, работоспособность, отказ – характеризуют РЭС.

Отказы по характеру изменения параметров аппаратуры до момента их возникновения подразделяют на внезапные (катастрофические) и постепенные. Постепенные отказы характеризуются временным изменением одного или нескольких параметров, внезапные — скачкообразно изменяющимися.

По взаимосвязи между собой различают отказы независимые, не связанные с другими отказами, и зависимые.

По повторяемости возникновения отказы бывают одноразовые (сбои) и перемежающиеся. Сбой – однократно возникающий самоустраняющийся отказ, перемежающийся – многократно возникающий сбой одного и того же характера.

По наличию внешних признаков различают отказы явные, т.е. имеющие внешние признаки после их появления, и неявные (скрытые), для обнаружения которых требуется провести соответствующие действия.

По причине возникновения отказы подразделяют на конструкционные, производственные и эксплуатационные, вызванные нарушением установленных норм и правил при конструировании, производстве и эксплуатации ЭА.

По характеру устранения отказы делятся на устойчивые и самоустраняющиеся. Устойчивый отказ устраняется заменой отказавшего элемента (модуля), а самоустраняющийся исчезает сам, но может повториться. Самоустраняющийся отказ может проявиться в виде сбоя или в форме перемежающегося отказа.

Возникновение отказов происходит как из-за внутренних свойств аппаратуры, так и из-за внешних воздействий и носит случайный характер. Для количественной оценки отказов используют вероятностные методы.

Свойства надежности:

1. безотказность;
2. долговечность;
3. ремонтпригодность;
4. сохраняемость.

#Безотказность – способность ЭА непрерывно сохранять заданные функции в течение установленного в технической документации.

#Долговечность – свойство изделия сохранять работоспособность до конца износа.

#Ремонтпригодность – приспособленность изделия к обнаружению, устранению и предупреждению отказов.

#Сохраняемость – свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние (в процессе хранения и после транспортировки).

Восстанавливаемые и невосстанавливаемые РЭС. Показатели надежности невосстанавливаемых РЭС и связь между ними.



Простые – работают; не работают.

Сложные – множественные состояния.

Показатели надежности.

	Свойство
1. вероятность безотказной работы, $P(t)$	– безотказность
2. вероятность отказа, $Q(t)$	– безотказность
3. частота отказов, $f(t)$	– безотказность
4. интенсивность отказов, $\lambda(t)$	– безотказность
5. средняя наработка на отказ (продолжительность работы изделия до появления отказа) T_{CP}	– безотказность
1. вероятность восстановления, $P_B(t)$	– ремонтпригодность
2. интенсивность восстановления, $\mu_B(t)$	– ремонтпригодность
3. среднее время восстановления, T_B	– ремонтпригодность
4. коэффициент готовности, $K_r(t)$	– ремонтпригодность
5. коэффициент оперативной готовности, $K_{Or}(t)$	– ремонтпригодность

Дополнительно:

- | | |
|---|-----------------|
| 1. назначенный ресурс, γ | – долговечность |
| 2. средний срок сохраняемости (в годах) | – долговечность |

Статистические определения показателей надежности невосстанавливаемых РЭС.

Вероятность безотказной работы и частоту отказов можно найти статистически по данным об отказах эксплуатируемых изделий:

$$P = (N - n) / N, \quad f = n / (Nt),$$

где N – число изделий в начале испытаний; n – число изделий, отказавших за время испытаний t (при значительном числе изделий вероятность P совпадает с вероятностью $P(t)$, а частота отказов f — с $f(t)$).

Функцию частоты отказов можно записать в виде^

$$f(t) = [q(t + \Delta t) - Q(t)] / \Delta t.$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ вероятность отказа $Q(t)$ можно определить интегрированием функции частоты отказов:

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt.$$

За время t вероятность безотказной работы:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (9.7)$$

Продифференцировав (9.7), получим:

$$dP(t) / dt = - f(t) \text{ или } f(t) = -dP(t) / dt = -P'(t).$$

Таким образом, функция $f(t)$ характеризует скорость снижения надежности во времени.

Критерием, более полно определяющим надежность невосстанавливаемой (неремонтируемой) РЭС и ее модулей, является интенсивность отказов $\lambda(t)$ – число отказов в единицу времени, отнесенное к среднему числу изделий, безотказно функционирующих в указанный промежуток времени. Этот показатель характеризует надежность РЭС в любой момент времени и рассчитывается по формуле:

$$\lambda(t) = \Delta n_i / (N_{cp} \Delta t_i),$$

где $\Delta n_i = N_i - N_{i+1}$ – число отказов;

$N_{cp} = (N_i + N_{i+1}) / 2$ – среднее число работоспособных изделий;

N_i и N_{i+1} – количество работоспособных изделий в начале и конце промежутка времени Δt_i

Вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с интенсивностью отказов $\lambda(t)$ зависимостью:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (9.8)$$

Если РЭС содержит N последовательно соединенных однотипных элементов, то:

$$\lambda_N(t) = N \lambda(t).$$

Средняя наработка на отказ T_{CP} и вероятность безотказной работы $P(t)$ связаны зависимостью:

$$T_{CP} = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (9.9)$$

По статистическим данным:

$$T_{CP} = \sum_{i=1}^m \Delta n_i t_{CPi} / N_i ; \quad t_{CP} = (t_i + t_{i+1}) / 2 ; \quad m = t / \Delta t$$

где Δn_i – количество отказавших изделий за интервал времени $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$;
 t_i, t_{i+1} – соответственно время в начале и конце интервала испытаний ($t_1 = 0$);
 t – интервал времени, за который отказали все изделия;
 m – число временных интервалов испытаний.

Структурные схемы надежности.

Модели надежности

#Модель надежности – это математическое или физическое представление объекта, адекватно отражающее его надежностные характеристики и позволяющее получить требуемые показатели надежности данного объекта

Требования к моделям – адекватность; решимость.



Физические модели – основаны на анализе отказов технологически однотипных элементов (контактные соединения).

Комбинированные модели – сочетают в себе и то и другое

Структурные модели – бывают 3-х видов: последовательная (основная схема); параллельная схема; комбинированная.

Основная схема:

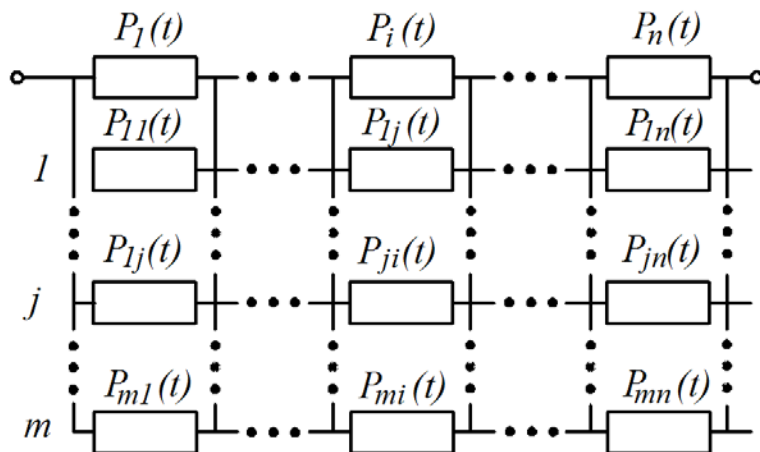


Модель надежности реального изделия представляют в виде последовательных структур схемы, в которой каждый элемент изделия (резисторы и т.д.) представляет собой либо вероятность безотказной работы элемента, либо вероятность отказа. Все элементы находятся в 2-х состояниях: работает; не работает. Отказ любого одного элемента приводит к отказу всей системы.

Вероятность безотказной работы системы: $P_C(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t)$, где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го модуля за время t ; n – число модулей системы.

Если все элементы равновероятны, то $P_C(t) = P_i^n(t)$.

Параллельная схема:

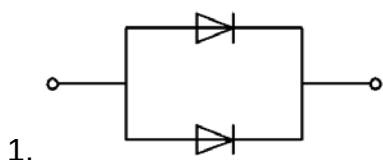


Выход из строя одного элемента не приводит к выходу из строя всей системы.

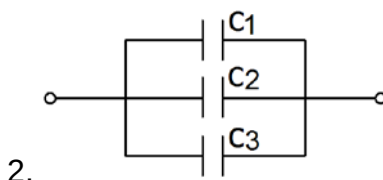
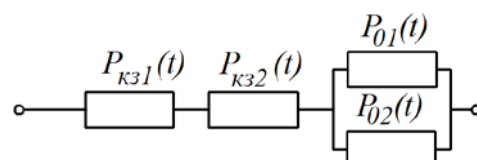
$$Q_C(t) = \prod_0^m Q_{ji}(t); \quad Q_C(t) = \prod_0^m [1 - P_{ji}(t)]$$

$$P_C(t) = 1 - Q_C(t) = 1 - \prod_0^m [1 - P_{ji}(t)].$$

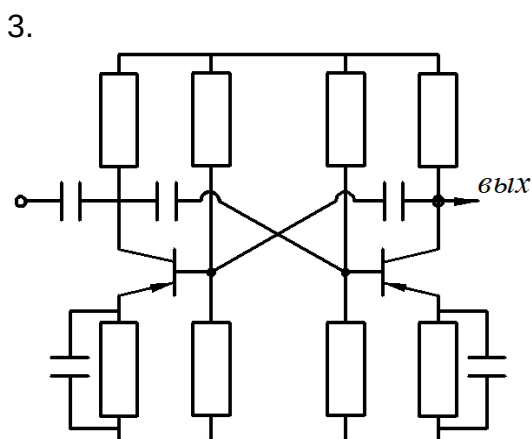
Комбинированная схема:



Если вероятность отказов по обрыву равна вероятности отказов по пробое



Представление в виде смешанной схемы



Выход любого элемента приведет к отказу

Цель расчета надежности. Методы расчета надежности по внезапным отказам на стадиях технического предложения, эскизного и технического проекта.

Расчет надежности заключается в определении показателей надежности изделия по известным характеристикам надежности составляющих компонентов и условиям эксплуатации.

Расчет надежности бывает: – прикидочный (на стадии проектирования)
– ориентировочный (на стадии эскизного проектирования)
– окончательный (на стадии рабочего проектирования)

1. Прикидочный расчет (на этапе технического предложения), нужны ли элементы резервирования, нужны ли дополнительные меры для достижения надежности.

$P_C(t) = e^{-\lambda t}$, где t – время предполагаемой работы;

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_{iЭ}.$$

2. Ориентировочный расчет (на стадии эскизного проектирования)

3. Окончательный расчет (расчет практически аналогичен, только учитываются коэффициенты нагрузки элементов):

$$\lambda_{\text{сист.оконч}}(t) = \lambda_0 a(k_n T_0) = \prod_{j=1}^m k_j$$

λ_0 – для конкретных элементов;

k_n – коэффициент электронной нагрузки;

T_0 – температура