

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Владимирский государственный университет

Л.Н. Панков  
Г.Ф. Долгов

В.Р. Асланянц  
В.В. Евграфов

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ»**

Владимир 2007

УДК 621.38  
ББК 32.844  
У 91

Рецензенты:

Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой ИУ-4 Московского государственного  
технического университета им. Н.Э. Баумана  
*В.А. Шахнов*

Кандидат технических наук, доцент  
Владимирского государственного университета  
*Е.А. Калинин*

Печатается по решению редакционного совета  
Владимирского государственного университета

**Панков, Л. Н.**

У 91 Учебное пособие по дисциплине «Основы проектирования электронных средств» / Л. Н. Панков, В. Р. Асланянц, Г. Ф. Долгов, В. В. Евграфов ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 260 с. – ISBN 5-89368-735-3.

Изложены общие принципы конструкторского проектирования электронных средств различного функционального назначения, работающих в различных условиях эксплуатации. Показывается история развития электронных средств, сложность задач, решаемых при проектировании, роль конструктора при создании современных электронных средств.

Рассматриваются задачи, решаемые конструктором при проектировании: обеспечение электромагнитной совместимости, защита от механических воздействий, влаги, перегрева. Рассмотрены задачи эргодизайна. Показываются возможности автоматизации процесса проектирования.

Предназначено для студентов по направлениям и специальностям 210200 «Проектирование и технология электронных средств», 200300 «Биомедицинская инженерия», 200402 «Инженерное дело в медико-биологической практике», 210300 «Радиотехника», 140607 «Электрооборудование автомобилей и тракторов», для студентов других специальностей при изучении вопросов теории и практики проектирования электронных средств.

Табл. 24. Ил. 145. Библиогр.: 33 назв.

УДК 621.38  
ББК 32.844

ISBN 5-89368-735-3

© Владимирский государственный  
университет, 2007

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Список использованных сокращений .....   | 7  |
| Список использованных обозначений .....  | 7  |
| Введение .....   | 8  |
| 1. История развития конструкций электронных средств.<br>Определяющие факторы развития, методы проектирования<br>и конструирования, проблемы и противоречия ..... | 9  |
| 1.1. История развития конструкций ЭС I и II поколений.....   | 9  |
| 1.2. История развития конструкций ЭС III<br>и IV поколений .....   | 12 |
| 2. Структура и классы электронных средств .....  | 13 |
| 2.1. Классификация ЭС по условиям эксплуатации,<br>требования к конструкциям ЭС данных<br>классификаций .....  | 13 |
| 2.2. Классификация ЭС по конструктивным<br>функциональным признакам .....  | 14 |
| 3. Требования, предъявляемые к конструкции электронных<br>средств.....   | 16 |
| 3.1. Общие технические требования.....   | 17 |
| 3.2. Общие эксплуатационные требования.....  | 23 |
| 4. Общая характеристика процесса проектирования<br>электронных средств.....  | 31 |
| 4.1. Системный подход к проектированию ЭС.<br>Сущность системного подхода .....  | 31 |
| 4.2. Роль и задачи конструктора при проектировании.....  | 36 |

|   |    |
|---|----|
| 5. Проектирование несущих конструкций .....   | 38 |
| 5.1. Несущие элементы конструкции ЭС .....  | 38 |
| 5.2. Особенности конструкций деталей,<br>изготавливаемых литьём под давлением .....                                       | 42 |
| 5.3. Особенности конструкции штампованных деталей<br>в ЭС .....   | 44 |
| 5.4. Несущие конструкции. Основы расчёта .....  | 52 |
| 6. Система межсоединений. Проектирование печатного<br>монтажа .....   | 58 |
| 6.1. Разновидности печатных плат .....  | 58 |
| 6.2. Основные требования к проектированию печатного<br>монтажа, трассировка и расчёты печатных<br>элементов монтажа ..... | 60 |
| 6.3. Особенности конструирования печатных плат<br>с поверхностно-плоскостным монтажом<br>компонентов .....                | 61 |
| 6.4. Особенности оформления чертежа печатной платы .....  | 66 |
| 6.5. Проводные и кабельные линии связи .....  | 72 |
| 6.6. Волоконно-оптические линии связи .....   | 74 |
| 7. Основы защиты ЭС от тепловых нагрузок .....  | 81 |
| 7.1. Основные факторы и законы охлаждения .....   | 81 |
| 7.2. Основы расчёта температуры перегрева .....   | 84 |
| 7.3. Методы интенсификации охлаждения.<br>Элементы локального охлаждения .....  | 86 |
| 7.4. Общие системы охлаждения .....   | 88 |
| 7.5. Основы автоматизации выбора способа<br>охлаждения электронных средств .....  | 91 |
| 8. Основы защиты ЭС от механических воздействий .....   | 97 |
| 8.1. Удары и вибрации в ЭС. Конструктивные методы<br>обеспечения вибро-, ударопрочности<br>и устойчивости .....           | 97 |

|   |     |
|---|-----|
| 8.2. Частотная отстройка .....  | 103 |
| 8.3. Основы расчёта вибропрочности ячеек МЭА<br>с теплоотводящим основанием.....                | 104 |
| 8.4. Виброизоляция устройств и приборов.<br>Особенности виброизоляторов.....                    | 105 |
| 8.5. Динамическое гашение колебаний .....   | 115 |
| 8.6. Демпфирование колебаний .....  | 117 |
| 8.7. Основы автоматизации выбора способов<br>виброзащиты ЭС .....                               | 118 |
| 9. Влагозащита электронных средств .....  | 125 |
| 9.1. Влияние влаги на ЭС и общие методы влагозащиты.....  | 125 |
| 9.2. Герметизация ЭС. Основы проектирования .....   | 127 |
| 9.3. Расчёт разъёмных соединений герметизации.....  | 129 |
| 9.4. Герметизация электрических соединений<br>и подвижных элементов герметических корпусов..... | 133 |
| 9.5. Основы автоматизации выбора способа<br>влагозащиты ЭС .....                                | 134 |
| 10. Обеспечение стойкости ЭС к электромагнитным<br>и ионизирующим излучениям.....               | 146 |
| 10.1. Источники и приёмники помех в ЭС .....  | 146 |
| 10.2. Экранирование электрического поля.<br>Электростатические экраны .....                     | 150 |
| 10.3. Экранирование магнитного поля. Магнитные<br>экраны .....                                  | 151 |
| 10.4. Электромагнитные экраны. Особенности<br>конструкции .....                                 | 154 |
| 10.5. Помехи в ЭС через электромонтаж.<br>Особенности экранирования проводов ЭС .....           | 160 |
| 10.6. Основы расчета паразитных параметров<br>печатного монтажа.....                            | 166 |
| 10.7. Обеспечение электрической прочности<br>в конструкциях ЭС.....                             | 175 |

|   |     |
|---|-----|
| 10.8. Обеспечение стойкости ЭС к ионизирующим излучениям .....  | 180 |
| 10.9. Основы автоматизации выбора способов электромагнитной защиты ЭС.....                              | 186 |
| 11. Особенности проектирования ЭС для различных условий эксплуатации и функционального назначения ..... | 192 |
| 11.1. Особенности условий эксплуатации и проектирования самолетной аппаратуры .....                     | 192 |
| 11.2. Особенности условий эксплуатации и проектирования корабельной аппаратуры .....                    | 200 |
| 11.3. Особенности условий эксплуатации автомобильной аппаратуры .....                                   | 201 |
| 11.4. Особенности условий эксплуатации и проектирования носимой аппаратуры .....                        | 202 |
| 11.5. Особенности проектирования ЭС различного функционального назначения .....                         | 203 |
| 12. Художественное оформление конструкции электронных средств.....                                      | 215 |
| 12.1. Основы композиции .....   | 218 |
| 12.2. Категории композиции .....  | 219 |
| 12.3. Средства композиции .....   | 222 |
| 12.4. Особенности внешнего оформления профессиональных и бытовых электронных средств.....               | 230 |
| 13. Оценка качества конструкции .....   | 241 |
| 13.1. Качество и возможность его оценки .....   | 241 |
| 13.2. Расчет и оценка показателей качества электронных средств .....                                    | 247 |
| Заключение.....   | 256 |
| Библиографический список.....   | 258 |

## Список использованных сокращений

АКСС – амортизатор корабельный стальной со страховкой  
АПМ – алюминий плакированный медью  
ВЧ – высокие частоты  
ЛКП – лакокрасочное покрытие  
ЛР – линейный регенератор  
МП – магнитное поле  
НЧ – низкие частоты  
ОКТ – общие конструкторские требования  
ОЭТ – общие эксплуатационные требования  
ПД – полимерный демпфер  
ПП – печатная плата  
ППП – полупроводниковые приборы  
ППУ – пенополиуретан  
РЛС – радиолокационная станция  
РТУ – радиотехнические устройства  
РПУ – радиопередающее устройство  
СЭ – силовые элементы  
ТКЕ – температурный коэффициент ёмкости  
ТКИ – температурный коэффициент индуктивности  
УС – управляющий сигнал  
ЭМИ – электромагнитный импульс (излучение)  
ЭП – электрическое поле  
ЭС – электронные средства  
ЭСР – электростатический разряд  
ЭРЭ – электрорадиоэлементы

## Список использованных обозначений

$A$  – амплитуда виброперемещения  
 $\omega$  – круговая частота  
 $\lambda$  – интенсивность отказов  
 $\eta$  – коэффициент механических потерь  
 $Q_k$  – интенсивность теплового потока  
 $P(t)$  – вероятность безотказной работы  
 $I$  – ускорение при механическом воздействии  
 $g$  – ускорение свободного падения  
 $f$  – частота  
 $D$  – цилиндрическая жёсткость  
 $\sigma$  – механическое напряжение  
 $\beta$  – коэффициентом демпфирования  
 $\mu$  – коэффициент передачи

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование электронных средств (ЭС) содержит системно-техническое, схемотехническое, конструкторское, технологическое проектирование, а также изготовление и испытание опытных образцов.

В учебном пособии рассматриваются в основном вопросы конструкторского проектирования с учетом факторов влияния электрической схемы, условий эксплуатации и назначения ЭС, условий производства, определяющих требования к конструкции.

**КОНСТРУКЦИЯ** (лат. *constructio*) – строение, устройство, взаимное расположение частей какого-либо предмета, машины, прибора и т. п., определяющееся его назначением.

Под конструкцией электронного средства понимается совокупность элементов и деталей с различными физическими свойствами и формами, находящимися 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.

Целью проектирования является разработка такой схемы и конструкции, которые обеспечивают выполнение заданных требований и наилучшие показатели качества. Качество оценивается комплексным показателем, который учитывает функциональные параметры, определяемые электрической схемой, конструктивные, экономические параметры, параметры эргономики, эстетики, удобства и безопасности, а также технологичности производства. Указанные частные показатели качества взаимосвязаны, противоречивы, а поэтому при проектировании необходимо найти такие решения, которые обеспечивают оп-



тимальность комплексного показателя качества с учетом важнейших для данного изделия частных показателей.

При этом разработчик электронных средств должен обладать знаниями по всем вопросам схемотехнического, конструкторского и технологического проектирования:

- виды и порядок разработки технической документации;
- влияние внешних факторов на работоспособность ЭС;
- методы проектирования и изготовления микроэлектронных изделий;
- методы конструирования элементов, узлов и устройств ЭС;
- обеспечение электромагнитной совместимости, механической прочности, нормальных тепловых режимов и надежности;
- проектирование ЭС с учетом требований эргономики и технической эстетики;
- особенности основных технологических процессов изготовления деталей, а также сборки и монтажа модулей ЭС;
- возможности систем автоматизированного проектирования;
- оценка качества ЭС.

Все эти проблемы представлены вниманию читателей в предлагаемой книге.

Пособие написано на основе курса лекций, читаемых в ВлГУ для студентов специальностей радиоэлектронного профиля.

## **1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ. ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ, МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПРОТИВОРЕЧИЯ**

### **1.1. История развития конструкций ЭС I и II поколений**

Конструирование электронных средств началось одновременно с изобретением радио. Общая конструкция аппаратуры беспроводного

го телеграфа первые десятилетия не отличалась от телеграфной аппаратуры тех лет. Соединения осуществлялись с помощью проволоки, клемм и винтов. Основой конструкции служил деревянный ящик, внутри которого на стенках размещались необходимые составные части.

С изобретением электронной лампы и увеличением коэффициентов усиления каскадов возросла роль экранирования. В конце 20-х годов прошлого века вместо деревянного появилось металлическое основание (шасси), что улучшило экранирование. В начале 30-х годов в телефонии стали использовать усилители, состоящие из блоков, размещаемых в вертикальных стойках. Такая конструкция была первым носителем идеи расчленения сложной аппаратуры на простые составные части (узлы или модули). Сформировалась иерархическая структура конструкции. Внедрение пайки вместо винтовых соединений упростило конструкцию монтажного соединения и снизило трудоемкость сборки.

С начала 40-х годов ЭС из помещений выходят в полевые условия. Их устанавливают на самолетах, в танках, на автомашинах. От работоспособности аппаратуры часто зависел исход военных операций. Обеспечение работоспособности и высокой надежности ЭС в трудных условиях эксплуатации легло на плечи конструкторов и технологов.

Конструкции I поколения ЭС имели простую электрическую принципиальную схему на дискретных электрорадиоэлементах с электровакуумными приборами в качестве активных элементов. Конструкции выполнялись в виде моноблоков, когда на шасси размещались крупногабаритные элементы конструкции, а в подвале шасси – электромонтаж навесным проводом. Органы управления и отображения информации выносились на переднюю панель. Конструкция помещалась в кожух.

В дальнейшем электрическая принципиальная схема усложняется. Появляются устройства широкого функционального разнообразия, которые могут быть помехочувствительными и помехонесущими. Появился функционально-узловой метод конструирования, когда

схема и конструкция расчленились на конструктивно обособленные составляющие. Это обеспечило возможность пространственного разнесения и компоновки, кроме того, возможность специализации производства. Изделия специализированного производства с хорошими функциональными характеристиками унифицировались и получали широкое применение как модули конструкции. Появился модульный метод конструирования.

Использование электронных средств в различных сферах деятельности человека существенно усложнило условия эксплуатации. Аппаратура должна быть вибро- и ударозащищённой, влагозащищённой, теплоустойчивой. Возникла проблема охлаждения. Уменьшать габаритные размеры плотной компоновкой не представлялось возможным.

Подвижные объекты требовали минимизации габаритных размеров и массы конструкции. Объекты назначения требовали обеспечить вибро- и ударопрочность, герметичность, влагостойкость. Решить задачу минимизации габаритных размеров плотной компоновкой было нельзя, так как увеличилась отводимая мощность, и не обеспечивался тепловой режим работы. Поэтому необходимо было уменьшить тепловые потери в конструкции и прежде всего от радиоламп. Тогда стали использовать миниатюрные радиолампы (типа жёлудь) с гибкими выводами, которые позволяли уменьшить габаритные размеры, но усложнялась проблема электро монтажа. Появилась необходимость в жёстком компактном электро монтаже, который должен быть высокотехнологичным (т. е. исключать ошибки монтажа и возможность автоматизации). Был предложен печатный монтаж, появились печатные платы как элементы электрического монтажа и конструкции. Печатный монтаж позволил существенно уменьшить габаритные размеры конструкции, однако осталась проблема теплоотвода. В 1948 – 1949 гг. появились полупроводниковые приборы, которые во многих конструкциях заменили радиолампы. Уменьшились энергопотребление и потери. Появилась аппаратура II поколения с элементной базой из дискретных элементов и полупроводниковых приборов. Вид монтажа печатный. Конструктивно законченным узлом явилась ячейка.

Недостатки конструкций II поколения:

1. В случае сложной электрической принципиальной схемы, содержащей большое количество элементов и проводов соединения, конструкция получается крупногабаритной.

2. Конструкции предполагали большой объём ручной работы при сборке и электромонтаже, т. е. были нетехнологичны.

3. Остро стояла проблема локального охлаждения мощных транзисторов, когда радиаторы были соизмеримы с несущими конструкциями аппаратуры.

## 1.2. История развития конструкций ЭС III и IV поколений

Решить задачу минимизации габаритных размеров и автоматизации производства удалось в 1951 г., когда на кристалле полупроводника стали делать не только транзистор, но и всю электрическую принципиальную схему узла ЭС, т. е. микросхему. Появились микросхемы 1-й, 2-й степени интеграции.

Аппаратура III поколения создавалась на элементной базе из корпусированных интегральных схем невысокой степени интеграции с использованием печатного монтажа. Основным элементом конструкции являлась ячейка, представляющая функционально законченную структуру. Третье поколение ЭС позволило уменьшить размеры конструкции, увеличить технологичность конструкции, её надёжность.

В случае сложной схемы и сложных условий эксплуатации аппаратура III поколения оказывается громоздкой и тяжелой. Уменьшить размеры конструкции и увеличить её технологичность можно, перенеся сложность из конструкции аппаратуры в сложность элементной базы: микросхем и микросборок.

Появились большие интегральные схемы (БИС), микросборки 3-й, 4-й степени интеграции, корпусные и бескорпусные, выполняемые по кристалльной схеме. Количество полупроводниковых приборов уменьшается с сотен до единиц штук. Такие конструкции называют ЭС IV поколения. Они имеют следующие **проблемы**:

1. Проблема охлаждения БИС и микросборок. Для локального охлаждения в ячейках предлагают теплоотводящие шины, теплоотводящие основания ячеек, а также трубы, вентиляторы.

2. Проблема высокоточного плотного печатного монтажа, когда необходим 4, 5-й класс точности с шириной проводника 0,1 мм и зазором 0,1 мм.

### **Контрольные вопросы**

1. Как выглядели первые конструкции ЭС?

2. В чем отличительные особенности конструкций ЭС первого поколения?

3. Предпосылки создания и отличительные особенности конструкций ЭС второго поколения.

4. Каковы основные недостатки конструкций ЭС второго поколения?

5. Предпосылки создания и отличительные особенности конструкций ЭС третьего поколения.

6. В чем отличительные особенности и основные проблемы конструкций ЭС четвертого поколения?

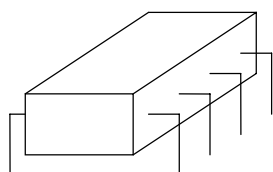
## **2. СТРУКТУРА И КЛАССЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

### **2.1. Классификация ЭС по условиям эксплуатации, требования к конструкциям ЭС данных классификаций**

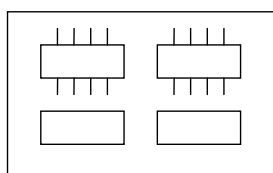
Условия эксплуатации задают климатическими и механическими факторами воздействия. Климатические включают требования по теплоустойчивости и теплопрочности, по морозоустойчивости и морозостойкости, брызго- и водовоздействию, повышенному и пониженному атмосферному давлению.

Механические воздействия задают диапазоном частот вибрации, величиной ускорения, скорости, перемещения на элементы конструкции при вибрациях и ударах.

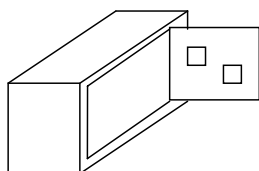
Проектируемая аппаратура должна быть устойчивой и прочной. Под устойчивостью понимают способность аппаратуры функционировать в заданных пределах воздействий. Под прочностью понимают способность аппаратуры выдержать, не разрушаясь, возмущающее воздействие и продолжать функционировать после снятия возмущающих нагрузок.



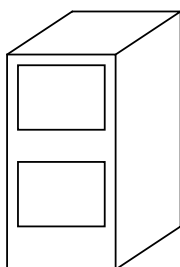
Модуль 0-го уровня.  
Интегральная схема



Модуль 1-го уровня.  
Ячейка



Модуль 2-го уровня.  
Блок



Модуль 3-го уровня.  
Стойка, шкаф

*Модули электронных средств*

Технические требования на разработку задаются стандартом, в котором ЭС расквалифицированы по группам условий эксплуатации.

Так, ГОСТ 16019–2001 определяет следующие группы аппаратуры.

1. Наземная стационарная (в отапливаемых и неотапливаемых помещениях).
2. Наземная возимая (колёсного, гусеничного хода).
3. Носимая (предназначена для эксплуатации на открытом воздухе в руках оператора. Она должна быть брызго- и влагозащищённой).
4. Корабельная (судовая) – может быть на верхней палубе и внутри кают.
5. Бортовая (самолётная, вертолётная).

## 2.2. Классификация ЭС по конструктивным функциональным признакам

В настоящее время существует большое число ЭС и их конструкций, которые можно классифицировать:

- 1) по функциональному назначению системы, например самолётный метеонавигационный радиолокатор, ЭВМ управления робототехническим комплексом;

2) функциональному назначению отдельных устройств, например пульт станка с ЧПУ, индикатор РЛС;

3) частотному диапазону сигналов, например низкочастотные – блок питания, устройство автоматики; высокочастотные – блок усиления видеосигнала, блок гетеродина устройства связи; сверхвысокочастотные – малошумящий усилитель, усилитель мощности;

4) по конструктивной сложности, например ИС, плата, блок, шкаф, пульт, стойка;

5) типу производства (единичное, серийное, массовое).

Классификация по функциональному назначению часто является доминирующей, так как объект установки ЭС в решающей степени определяет специфику конструкции (защита от дестабилизирующих факторов, масса, форма, энергопотребление, стоимость, надёжность).

ЭС классифицируют по конструктивным, функциональным и эксплуатационным признакам. В настоящее время применяется функционально-узловой (модульный) метод проектирования, когда аппаратура расчленяется на модули различной степени сложности и значимости. Различают модули различных уровней (см. рисунок).

Ячейка – конструкция на односторонней, двухсторонней или многослойной ПП, на которой размещаются микросхемы, микросборки и прочие электрорадиоэлементы. Размеры ячеек унифицированы и подчиняются определённому ряду значений.

Блок – схемно- и конструктивно законченная часть ЭС, выполняющая определённые функции в ЭС, эксплуатационно неавтономная, несамостоятельная. Блоки как модули регламентированы по размерам и принципам построения электрической принципиальной схемы.

Блоки ЭС являются составляющими модулей 3-го уровня, которые оформляются в виде стойки, шкафа и т. п. По функциональной значимости модули 3-го уровня могут быть радиоприбором, радиотехническим устройством (РТУ).

Радиоприбор – схемно и конструктивно законченное изделие, выполняющее определённые самостоятельные функции, эксплуатируемое автономно (телевизор, радиоприёмник).

РТУ – схемно и конструктивно законченное изделие, выполняющее определённые функции в системе и эксплуатируемое не автономно, а лишь как автономно обособленное в системе (стойка радиоприёмника в системе связи).

Следовательно, РТУ могут составить совокупность, т. е. модуль 4-го уровня, оформляя по функциональной значимости радиотехническую систему.

### **Контрольные вопросы**

1. Какими факторами задают условия эксплуатации?
2. Что понимается под устойчивостью и прочностью?
3. Какие группы условий эксплуатации определяются стандартами?
4. Классификация ЭС по конструктивным, функциональным и эксплуатационным признакам.
5. Дайте понятия модулей ЭС различного уровня.
6. Что такое ячейка, блок, радиоприбор, радиотехническое устройство?

### **3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

К проектируемой аппаратуре предъявляются требования по всем параметрам. По содержанию и назначению технические требования могут быть следующими:

1) общие технические требования, т. е. требования, обязательные для выполнения любого вида и любого класса проектируемой аппаратуры;

2) экономические – которые определяют ограничения по стоимости проектируемого изделия, эффективность изделия от производства и эксплуатации;

3) специальные – заданные конкретными значениями и ограничениями, которые определяют специфику функционирования.



### 3.1. Общие технические требования

Общие технические требования, предъявляемые к любой проектируемой аппаратуре, делят на общие эксплуатационные требования (ОЭТ) и общие конструкторские требования (ОКТ).

#### ***Общие конструкторские требования***

Эта группа требований определяет особенности конструкторских реализаций. К ним относят:

##### ***1. Минимальные габаритные размеры и массу***

Если решать задачу плотной компоновкой элементов, то возникают две проблемы: охлаждения и жёсткого плотного точного электрического монтажа. Комплексным перспективным направлением минимизации конструкции является микроэлектронная реализация на печатных платах 4-го, 5-го классов точности. Интенсивность отказа микросхем меньше суммы интенсивностей отказов дискретных электрорадиоэлементов, на которых могла быть построена схема. Стоимость изделия на микросхемах получится меньше, чем на дискретных элементах, если производство серийное или массовое.

##### ***2. Надёжность***

Надёжность – сложное качество, для оценки которого используются показатели:

- 1) безотказность;
- 2) долговечность;
- 3) сохраняемость;
- 4) ремонтпригодность.

1) Безотказность – способность аппаратуры сохранять работоспособность, непрерывно выполняя свои функции, без ремонта и без регламентных работ в течение времени наработки до отказа.

2) Долговечность – способность изделия сохранять работоспособность, выполнять свои функции с перерывами на ремонт, на регламентные работы до того времени, пока ремонт еще возможен.

3) Сохраняемость – способность аппаратуры сохранять работоспособность при хранении или транспортировке.

4) Ремонтпригодность предполагает удобство контроля, обнаружения, прогнозирования неисправности, удобство доступа, возможность замены неисправных элементов.

Надежность может оцениваться как по внезапным отказам, так и по постепенным.

**Под внезапным отказом** понимают быстрое, необратимое изменение параметров элементов, определяющее её неисправность.

**Под постепенным отказом** понимают медленное, постепенное изменение параметров элементов, когда параметры изделия выходят за допустимые пределы. Процесс обычно обратимый и после снятия возмущения параметры восстанавливаются.

**Надежность по внезапным отказам** считаются вероятностными статистическими методами через статистические оценки отказов ЭРЭ.

Надежность ЭРЭ оценивается интенсивностями отказов ЭРЭ  $\lambda$ , которые определяются по статистике испытаний элементов.

Интенсивность отказов находится по формуле

$$\lambda_{i0} = \Delta N / (N \cdot \Delta t),$$

где  $\Delta N$  – число отказавших ЭРЭ;  $N$  – число элементов;  $\Delta t$  – время испытания.

Реальная интенсивность отказов ЭРЭ зависит:

1) от коэффициента нагрузки  $K_H$ , например для резистора

$$K_H = P / P_M,$$

где  $P$  – реально рассеиваемая резистором мощность;

$P_M$  – максимально допустимая рассеиваемая резистором мощность;

для конденсатора

$$K_H = U / U_M,$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к конденсатору;

$U_M$  – максимально допустимое напряжение, прикладываемое к конденсатору.

Чем меньше коэффициент нагрузки ЭРЭ, тем больше надежность.

Обычно рекомендуется  $K_n = 0,7 \div 0,8$ .

2) Температуры эксплуатации и нагрева элементов в схеме.

Чем выше температура, тем меньше надежность, особенно для полупроводниковых элементов, моточных изделий

$$\lambda_i = \lambda_{i0} a_i K_3,$$

где  $a_i = \varphi(K_n, t)$  – коэффициент, одновременно учитывающий нагрузку элемента  $K_n$  и его температуру  $t$  (берется из справочника),

$K_3$  – коэффициент эксплуатации, который учитывает прочие факторы, например влажность, механические воздействия.

3) Климатических особенностей эксплуатации, ударов и вибрации при эксплуатации.

Эти факторы могут учитываться каждый своим поправочным коэффициентом или общим  $K_3$ .

4) Времени эксплуатации.

Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации представлена на рисунке и имеет три характерные зоны:

I – зона приработки (выявляется заводской брак);

II – зона нормальной эксплуатации ( $\lambda$  минимальна);

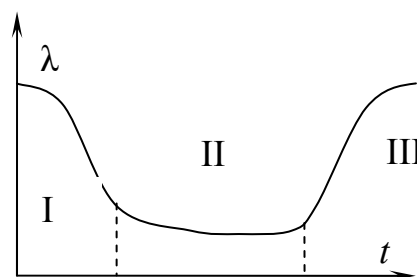
III – зона старения и износа.

Новые элементы изделия обладают повышенной  $\lambda$ , так как имеют скрытые технологические дефекты. Уменьшить  $\lambda$  можно приработкой на заводе-изготовителе.

5) от интенсивности отказа аппарата. Она в целом зависит от количества элементов и их надежности:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

где  $n$  – количество элементов.



Зависимость интенсивности отказов ЭС в период эксплуатации

Наработка на отказ проектируемого изделия для случая, когда отказ любого элемента приводит к отказу изделия, определяется выражением  $T = 1/\lambda$ .

Для некоторых устройств более важным является вероятность безотказной работы для заданного времени эксплуатации  $t$ :

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right).$$

Для случая широко применяемого экспоненциального закона, который справедлив во второй зоне, при  $\lambda(t) = const$  вероятность рассчитывается по формуле  $P(t) = \exp(-\lambda \cdot t)$ .

### **Надёжность ЭС по постепенным отказам. Методы повышения надёжности**

В устройстве могут быть элементы и узлы, чувствительные к внешним воздействиям и определяющие надёжность ЭС по постепенным отказам.

Если частота задающего генератора не стабильна и изменяется при эксплуатации на  $\Delta f$ , то частота передатчика в целом изменяется и может выйти за рамки допустимого. На задающий генератор оказывает дестабилизирующее влияние температура эксплуатации. Частота задающего генератора определяется резонансной частотой контура

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Так как  $L$  и  $C$  имеют температурный коэффициент, то будут изменяться при изменении температуры, а значит, будет изменяться частота. Изменение функции  $\Delta f$  при изменении аргументов  $\Delta L$ ,  $\Delta C$  можно найти, используя методы теории точности.

Если имеем функцию  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , то она может быть представлена разложением в ряд Тейлора

$$y = y_i + \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta X_i + \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 y}{\partial x_i^2} \Delta x_i^2 + \dots + \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x \partial y} \Delta X_i \Delta Y_j.$$

С достаточной точностью можно ограничиться слагаемыми первых порядков  $y - y_0 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta X_i$ .

Следовательно, уравнение для погрешности выходного параметра имеет вид  $\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta X_i$ .

Используя уравнение погрешности, найдём изменение частоты

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial f}{\partial C} \Delta C = \frac{1}{2\pi} C^{-\frac{1}{2}} \left(-\frac{1}{2}\right) L^{-\frac{3}{2}} \Delta L + \frac{1}{2\pi} L^{-\frac{1}{2}} \left(-\frac{1}{2}\right) C^{-\frac{3}{2}} \Delta C.$$

Найдём относительное изменение частоты

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right).$$

Из полученного выражения можно сделать следующие рекомендации повышения частоты и точности.

1) Необходимо уменьшить каждое слагаемое суммы, т. е. сделать индуктивность и ёмкость со стабильными параметрами. Поэтому этот метод называется параметрической стабилизацией.

Если влияет температура, то выбираем элементы контура с минимальными температурными коэффициентами. Например, применяют вместо  $LC$ -контуров кварцевые резонаторы, у которых температурный коэффициент на два порядка меньше, чем у  $LC$ -контуров.

2) Уменьшают нестабильность выходного параметра, предлагая компенсацию изменения одного параметра  $x$  другим параметром с другим знаком коэффициента влияния. Этот метод называется компенсацией.

Для температурной компенсации в контур автогенератора могут предлагаться термокомпенсирующие конденсаторы, у которых температурный коэффициент сопротивления отрицательный.

3) Устраняют причину нестабильности. Если влияет температура, то стабилизируют её, предлагая термостатирование. Например, в пе-

редатчиках высокой стабильности термостатируют контур или кварц либо автогенератор в целом. В настоящее время используют полупроводниковые микротермостаты.

### **3. Технологичность**

Технологичность конструкции изделия есть приспособленность к ограниченному расходованию трудовых, материальных и энергетических ресурсов при подготовке производства и промышленном выпуске изделий в заданном количестве по высшей категории качества (производственная технологичность), а также при техническом обслуживании и ремонте (эксплуатационная технологичность) [6].

### **4. Преемственность**

Преемственность – использование в новых изделиях деталей и сборочных единиц из ранее разработанных и освоенных в производстве ЭС. Степень преемственности характеризуется отношением количества стандартных, унифицированных, типовых элементов к общему количеству элементов в изделии. Предпосылкой преемственности является типизация элементов конструкции.

*Типизация* – обоснованное сведение многообразия избранных типов конструкций машин, оборудования, приборов, зданий, сооружений, технологических процессов и т. п. к небольшому числу.

*Унификация* – приведение различных видов продукции и средств её производства к рациональному минимуму типоразмеров, марок, форм, свойств и т. п.

*Стандартизация* – установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определённой области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности, для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении функциональных условий и требований техники безопасности.

### **5. Ремонтпригодность**

Для ремонтпригодности необходимо обеспечить:

1. Возможность контроля, поиска, прогнозирования неисправности. Для этого в конструкции должны быть предложены устройства индикации и контроля, определяющие наиболее характерные неис-

правности. В схему и в конструкцию вводятся контрольные точки, которые могут быть реализованы штырьками, гнёздами, контрольными площадками на плате. На печатной плате, а также на металлических несущих конструкциях должны быть маркировочные знаки элементов согласно обозначению на схеме.

2. Конструкция должна обеспечить лёгкость доступа к составным элементам. Для этого предлагают разъёмные и книжные варианты компоновки.

3. Конструкция должна обеспечить возможность замены вышедшего из строя модуля, элемента, а значит, при проектировании необходимо предложить разъёмные соединители для электрической коммутации наименее надежных частей, а также ключи, определяющие однозначность установки. Ключом обозначают положение 1-го вывода микросхемы, анода диода, положительного вывода полярного конденсатора и т. д.

### **3.2. Общие эксплуатационные требования**

Эта группа требований определяется особенностями эксплуатации и включает в себя:

#### **1. Работоспособность в заданных условиях эксплуатации**

Любая аппаратура должна выполнять свои функции в заданных условиях эксплуатации. Наиболее легкие режимы работы при этом оказываются у стационарной аппаратуры, эксплуатируемой в отапливаемых помещениях. Если же такую аппаратуру поставить на подвижные транспортные средства, то может произойти отказ, так как внешние вибрации могут вызвать резонанс элементов, из-за которого резко возрастут механические напряжения. Повышенная влажность вызывает снижение сопротивления изоляции, коррозию металлических деталей ЭС, разбухание полимерных материалов и другие негативные процессы. Пониженные и повышенные температуры недопустимы для некоторых ЭРЭ и интегральных микросхем (ИС), кроме этого пониженные температуры приводят к потере эластичности полимерных материалов. Если не учитывать внешние воздействующие факторы, то создать надежную аппаратуру не удастся.

## ***2. Удобство эксплуатации***

Удобство эксплуатации обеспечивается рациональной компоновкой органов управления и отображения информации. В зависимости от сложности устройства бывают варианты компоновки с централизованным и децентрализованным управлением. Централизованная система предполагает компоновку органов управления и отображения информации отдельным пультом управления. В случае децентрализованного управления органы управления komponуются непосредственно на передних панелях. Удобство эксплуатации во многом определяется компоновкой передней панели. На передней панели размещают органы отображения информации, управления и контроля. В качестве устройства отображения информации используются электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), индикаторы цифровые, стрелочные приборы, шкалы настройки, световая сигнализация. Устройства отображения информации komponуют в верхней части, чтобы их не закрывать рукой при работе оператора. Устройства управления рекомендуется размещать справа или снизу непосредственно под устройством отображения информации. Кроме того, на передней панели размещают устройства контроля: сигнальные лампочки накаливания, лампочки тлеющего разряда (неоновые), светодиоды, колодки контроля или гнезда для контроля работоспособности внешними устройствами. Для удобства эксплуатации все органы на передней панели должны иметь надписи о назначении и предельных положениях. Надписи выполняются буквами либо символами. Они могут выполняться гравировкой и затем затираться краской, контрастной к цвету панели. Для удобства управления особенно в условиях ограниченной видимости должны выполняться следующие общепринятые положения: положению “вкл”, “пуск”, увеличению регулируемого параметра соответствует положение ручки вверх или вправо или вращение по часовой стрелке.

Положению “выкл.”, “стоп”, уменьшению регулируемого параметра соответствует положение ручки вниз или влево, или вращение ручки против часовой стрелки.



При эксплуатации в условиях ограниченной видимости предлагается подсветка органов передней панели. Площадь передней панели ограничена, поэтому должны предлагаться следующие методы минимизации по площади:

1. Уменьшают габаритные размеры и площади под устройствами отображения информации за счёт их многофункциональности. Для того чтобы вести в приборах не только количественную, но и качественную оценку параметров, можно разделить шкалы приборов на секторы разной цветности или ввести световую сигнализацию аварийных уровней.

2. Сокращают количество органов управления и упрощают работу с ними за счёт замены органов управления кнопками. Это возможно, если предлагать многоканальные устройства с фиксированной настройкой частоты.

Подстройка же по частоте, по усилению выполняется автоматизированно за счёт схемотехнических решений.

Ручки управления на органы управления могут быть стандартны (стандартные ручки различных форм предназначены на разные усилия). В зависимости от усилия управления ручки могут быть: цилиндрические, типа клювик, цилиндрические рифлёные, ручки типа ворота на большие нагрузки.

Органы управления и ручки к ним должны выбираться на усилие управления при ударах и вибрациях. При механических воздействиях дополнительно возникают силы инерции, равные произведению массы управляющего элемента на величину ускорения.

### ***3. Эргономику конструкции***

Под эргономичностью понимают согласованность конструкции с возможностями и особенностями человека оператора. Эргономические требования включают в себя антропометрические (согласованность параметров конструкции с физическими особенностями человека) и психофизиологические (учитывают особенности человека по скорости восприятия информации и быстрдействию, по необходимой освещенности ЭС, по разрешающей способности глаза).

Исходя из **антропометрических требований** определяются допустимые значения массы устройств и их форма. Например, при проектировании пультов управления должны выполняться требования по форме и размерам с учётом позы оператора. Для снятия нагрузки с рук оператора предлагается столешница на высоте 750 мм. Чтобы угол зрения на передней панели был прямым, передняя панель должна быть наклонена на  $60^{\circ}$  к горизонту. Для компактных, миниатюрных приборов тоже рекомендуется выполнять переднюю панель наклонно. Чтобы исключить сканирование головой оператора сверху вниз размер по высоте передней панели не должен быть более 500 мм. Кроме того, панель ограничивают по ширине, заворачивая её вправо и влево так, чтобы доставала рука оператора.

**Психофизиологические показатели:** скорость и темп движений частей тела, характеристики зрения. Эти показатели необходимо учитывать при выборе конструкции элементов управления (ручек, кнопок, тумблеров). Необходимо соблюдать согласованность по быстродействию, освещённости, размерам и форме, комфортности. Исходя из требований психофизиологии, частота кадровой развёртки ЭЛТ должна быть не менее 24 кадров в секунду, т. е. больше 24 Гц. Скорость считывания информации на индикаторных устройствах зависит от смыслового содержания информации. Если информация смысловая, т. е. имеет логику, то скорость её восприятия может достигать 15 – 20 бит/с. Если без смысла (например шифрованная), то скорость восприятия не более 2 – 4 бит/с.

Размер надписей, оцифровок на передних панелях зависит от расстояния наблюдения и угла зрения  $\alpha$ , определяющего разрешающую способность глаза,  $\alpha = 3' - 12'$ . Разрешающая способность глаза зависит от условий освещения и времени наблюдения. Оптимальным временем наблюдения информации считается 0,5 с. Для устройств, которые работают в условиях ограниченной освещённости, должна предлагаться подсветка надписей шкал на передней панели устройства. Для того чтобы обеспечить подсветку на передней панели, равномерной по площади и разноцветной, предлагают конструкцию со светопрово-

дом. На лицевую панель устанавливается листовый светопровод, например из оргстекла. Чтобы закрыть прямой свет от лампочки, предлагается колпачок. Лицевая плоскость светопровода покрывается слоем металлизации или закрашивается, чтобы не пропускать свет. Надписи, знаки исполняются гравировкой по слою металлизации светопровода. Чтобы выполнить свечения надписей в различных зонах панели разным цветом, предлагают лампочки с различными светофильтрами и отсекатели света по границам светозон, выполненных гравировкой и закрашенных.

#### **4. Эстетику**

Красивая аппаратура в любом случае улучшает настроение людей, которые с ней работают. Оператор часто получает удовлетворение от процесса общения с красивой аппаратурой. Требование красивого внешнего вида прибора особенно важно при создании бытовых ЭС, когда аппаратура должна не только органически вписываться в интерьер помещения, но и украшать его.

#### **5. Безопасность эксплуатации**

При эксплуатации ЭС имеют место следующие факторы опасности и вредности для здоровья оператора.

1. Опасность поражения электрическим током.
2. Большой уровень тепловых излучений и высокие температуры в зоне эксплуатации.
3. Шум от работы систем и устройств управления ЭС (например система вентиляции).
4. Вибрации при работе систем и устройств управления, а также от объекта назначения.
5. Электромагнитные излучения, превышающие допустимый уровень.

Электромагнитное излучение опасно для оператора в диапазоне частот  $f = 60 \text{ кГц} \dots 300 \text{ ГГц}$  в зависимости от уровня излучения. В нижней части диапазона от 60 кГц до 300 МГц электромагнитное излучение измеряют и оценивают уровнем напряжённости электрического и магнитного поля.

Например, допустимые значения напряжённости  $E$  электрического поля даны в таблице.

Допустимые значения напряжённости  $E$   
электрического поля при различных частотах

|           |          |        |         |          |
|-----------|----------|--------|---------|----------|
| $f$ , МГц | 0,06 – 3 | 3 – 30 | 30 – 50 | 50 – 300 |
| $E$ , В/м | 50       | 20     | 10      | 5        |

В СВЧ диапазоне от 300 МГц до 300 ГГц электромагнитное излучение особо опасно и оценивается уровнем удельной мощности излучения на единицу поверхности  $P_{уд} = P/S$ , измеряемой в Вт/м<sup>2</sup>.

Допустимый уровень в СВЧ диапазоне  $P_{уд} = 0,1$  Вт/м<sup>2</sup>. В проектируемых устройствах источниками опасных излучений могут быть усилители ВЧ и СВЧ и их контуры, а также антенно-фидерные устройства. Эти устройства могут излучать по следующим причинам:

1. Не экранирован контур усилителя, или экран контура не имеет целостности. Качество экранирования уменьшается, если есть отверстия или прорези в нём. Излучать могут вентиляционные отверстия на высших гармонических составляющих рабочего сигнала или неправильно сориентированные относительно направления напряженности паразитного магнитного поля вентиляционные прорези.

2. Прорези, щели, окна в металлических корпусах, кожухах ЭС.

В конструкции необходимо обеспечить целостность экранирования кожухом или корпусом, устранив щели с помощью резиновой прокладки в экранирующей оплётке или резиновой прокладки из токопроводящей резины. Вентиляционные окна на металлическом кожухе экранируют с помощью металлических сеток.

В ЭС имеют место опасности поражения оператора электрическим током, если в ЭС присутствует электрическое напряжение 36 В и более. Чтобы обеспечить безопасность эксплуатации необходимо:

1. Исполнить устройство с корпусом, обеспечивающим защиту оператора от прикосновения к токопроводящим частям.

2. Если корпус металлический, то нужно обеспечить хороший электрический контакт между всеми металлическими несущими элементами конструкции, чтобы устранить возможную разность потенциалов между ними. Для этого все металлические несущие конструкции должны соединяться между собой болтами, винтами, проводами.

3. Металлические корпуса в ЭС должны иметь заземления через розетки, имеющие контакт заземления. Если устройства содержат опасное напряжение, то дополнительно предлагается сигнализация включения высокого напряжения. Для надёжности сигнализации предлагаются 2 лампочки включенного и отключённого состояния. Для надёжности работы при пониженных напряжениях рекомендуется применять лампочки тлеющего разряда. Кроме того, такие устройства должны иметь блокировку, которая отключает питание устройства при снятии крышки кожуха.

#### **6. Электромагнитную совместимость**

Источниками помех в ЭС являются:

1. Все генераторы высоких частот (ВЧ).

НЧ сигналы (тем более сигналы постоянного тока) слабо влияют. Они создают магнитное и электромагнитное поля, которые сильно затухают при удалении от источника.

ВЧ поля слабо затухают на расстоянии. Возникают электромагнитные волны, которые передаются на большие расстояния. Следовательно, ВЧ электромагнитное поле может быть причиной наводки на соседние ЭРЭ.

2. Провода с ВЧ токами.

3. Все генераторы импульсных сигналов, так как импульсный сигнал содержит широкий спектр частотных составляющих.

4. Провода с импульсными токами.

5. Все устройства, работа которых связана с включением и выключением цепей под током.

6. Все устройства, работа которых связана с искрением на контактах.

Искра на щётках двигателя имеет малую длительность, а значит, широкий спектр частот.

7. Все устройства и провода с высоковольтными токами, напряжениями, на острых кромках которых может быть стекание заряда (коронный разряд).

Чувствительными к помехам (приёмниками помех) являются:

- все усилители, прежде всего их входные цепи;
- нагрузка ВЧ усилителей;
- ВЧ дроссели, все катушки индуктивности.

Для электромагнитной совместимости устройств источников помех и приёмников помех необходимо ослабить связи между ними до допустимых значений. Помеха может приходиться от источника к приёмнику через следующие виды связи:

- электрическое поле;
- магнитное поле;
- электромагнитное поле;
- через общие цепи, например, цепи питания.

Для электромагнитной совместимости устройства ЭС рекомендуется:

1. Пространственное разнесение источников или приёмников помех.
2. Экранирование источников и приёмников помех.
3. Установка фильтров в общие цепи источника, приёмника помех.

Электрическая принципиальная схема диктует также особенности компоновки и конструирования тех устройств, которые чувствительны к внешним воздействиям и определяют ненадёжность по постепенным отказам.

### **Контрольные вопросы**

1. На какие основные группы делятся требования, предъявляемые к электронным средствам?

2. Какие общие конструкторские требования вы знаете?

3. Какие показатели надёжности ЭС вы знаете?

4. Что такое интенсивность отказов? Для чего она используется?

Как зависит интенсивность отказов от времени?

5. Как оценивается надёжность по постепенным отказам?

6. Что такое технологичность, приемственность, ремонтпригодность? Как их повысить?

7. Какие общие эксплуатационные требования вы знаете?
8. Каким образом можно улучшить удобство эксплуатации ЭС?
9. Что такое эргономичность конструкции?
10. Как обеспечить безопасность электронных средств?
11. Как обеспечить электромагнитную совместимость ЭС?
12. Что относят к специальным требованиям?

## **4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

### **4.1. Системный подход к проектированию ЭС.**

#### **Сущность системного подхода**

Системный подход предполагает рассмотрение объекта проектирования как системы. В общем случае под системой понимают множество взаимосвязанных объектов, рассматриваемых как одно целое.

В основе системного подхода лежат принципы целостности, многоаспектности, иерархичности и целевой принцип. Принцип целостности означает несводимость свойств системы к сумме свойств ее составных частей и невыводимость свойств системы только из свойств ее частей, т. е. появление новых свойств, отсутствующих у ее частей. Например, электрические свойства элементов сумматора, определяемые законами теории электрических цепей, приводят к появлению совершенно нового свойства: это устройство может суммировать двоичные числа.

Принцип многоаспектности предполагает рассмотрение объекта с различных точек зрения, т. е. в целостном рассмотрении различных аспектов. Этот принцип приводит к стратегии «серого ящика» в дополнении к стратегии «черного ящика», которая предполагает целостное рассмотрение объекта как взаимосвязь «входов» и «выходов».

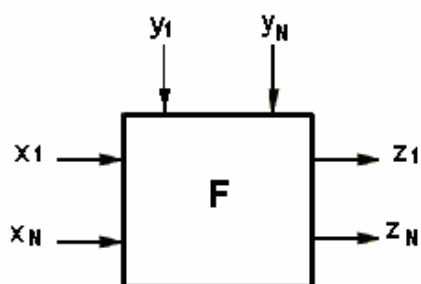
Применительно к проектированию электронных средств принцип многоаспектности приводит к определению подсистемы ЭС различного назначения: например подсистемы теплозащиты, электромагнитной совместимости и т. д.

Принцип иерархичности предполагает структурную многоуровневую декомпозицию объекта. Так, в конструкции ЭС можно выделить несущие конструкции, ячейки, электромонтаж и др. В свою очередь, например, ячейки ЭС состоят из ЭРЭ, печатных плат, соединителей и др.

И, наконец, целевой принцип предполагает четкую формулировку цели, которая может быть определена на основе рассмотрения системы более высокого уровня (метасистемы). В качестве такой метасистемы выступает обычно объект установки ЭС: автомобиль, самолет и др.

В общем случае под системой понимают множество взаимосвязанных объектов, рассматриваемых как одно целое, если выполняются следующие условия:

- 1) сформулированы цель, стоящая перед системой, и критерий качества ее функционирования;
- 2) могут быть выделены части, которые являются самостоятельными и называются подсистемами данной системы (например ячейка ЭС для блока);
- 3) может существовать некоторая другая система, включающая данную как подсистему (например стойка для блока ЭС).



*Рис. 4.1. Графическое представление системной математической модели конструкции*

### ***Обобщенная системная модель конструкции ЭС***

Каждую конструкцию ЭС можно представить как систему, состоящую из изменяемых  $X$  и неизменяемых  $Y$  факторов (ограничений), показателей качества  $Z$  и связей  $F$  между факторами и показателями качества (рис. 4.1).



**К** изменяемым в процессе конструирования факторам относятся, например, марки применяемых материалов, форма и размеры элементов конструкции, взаимное расположение компонентов и узлов, вид электрических связей, характер крепления компонентов, характер элементов усиления (ребер) и облегчения (выборок) несущих элементов, способы теплоотвода, герметизации, характер базовой конструкции, и т. д.

**Ограничениями** являются факторы, не изменяемые конструктором: ресурсные, системотехнические, схемотехнические, конструкторские, технологические, эксплуатационные.

- **К ресурсным** ограничениям относятся материальные, временные, кадровые и энергетические ограничения.

- **Системотехническими ограничениями** являются такие, как тип ЭС: аналоговые или цифровые, наземные или бортовые, с информационным или структурным резервированием или без него, работающие в режиме разового, многократного, непрерывного, периодического использования и т. д.

- **Схемотехническими ограничениями**, задаваемыми электрической схемой, являются элементная база (быстродействие, токи, помехоустойчивость, термочувствительность, стабильность параметров и т. д.), число и типы функциональных узлов, требования к их взаимному расположению и т. д.

- **Конструкторские ограничения:** масса и габаритные размеры; рекомендуемые типы базовых несущих конструкций, методы реализации электрических связей, помехозащищенность; виброударозащищенность, теплозащищенность, влагозащищенность; ограничительные перечни на материалы, полуфабрикаты, комплектующие изделия; требования к внешнему виду; патентоспособность и т. д.

- **Технологические ограничения:** требование преемственности конструкций, тип производства, вид технологических процессов, время запуска в производство, повторяемость выпуска, номенклатура основных технологических процессов и их стабильность, требования по автоматизации и т. д.

• **Эксплуатационные ограничения:** объект установки, уровень дестабилизирующих факторов – механических, климатических, тепловых, радиационных, электромагнитных воздействий; надежность; удобство и безопасность эксплуатации; технологический уровень ремонтной базы, квалификация обслуживающего персонала, требования по ремонтпригодности конструкции, время хранения, время эксплуатации (ресурс) и т. д.

Система показателей качества  $Z$  определяет пригодность конструкции для использования ее по тому или иному назначению, что регламентируется техническим заданием на разработку конструкции. Каждый показатель зависит от характера конструкции и ограничений:  $Z = F(X_i, Y_j)$ . Это могут быть отдельные параметры конструкции, например, стоимость, минимальные габаритные размеры, масса. Но чаще оценивают качество по комплексу параметров с учетом степени важности их для данного электронного средства.

### ***Внешние и внутренние параметры ЭС и этапы проектирования***

В процессе жизненного цикла ЭС проходит следующие этапы:

1. Системотехническое и схемотехническое проектирование, в котором разрабатываются электрические схемы: функциональная, структурная, заканчивается этап электрической принципиальной схемой.

2. Конструкторское проектирование, которое заканчивается комплектом конструкторской документации.

3. Технологическое проектирование, заканчивающееся комплектом конструкторской документации.

4. Производство ЭС, в результате которого получаем реальное ЭС.

5. Эксплуатация электронного средства.

6. Утилизация ЭС.

Целью первых трех этапов (этапов проектирования) является разработка такой конструкции, которая выполняет свои функции в заданных условиях эксплуатации. При проектировании ЭС представляют как составляющую системной иерархии, начиная от объекта назначения и ниже (см. рис. 11.1).

Всякая система может быть представлена совокупностью составляющих разных уровней. Составляющие системы каждого уровня имеют данные, их определяющие. Данные системы различных уровней являются взаимосвязанными и зависимыми. Система высшего уровня диктует системам низшего уровня требования, исходные данные на разработку. Например, самолёт должен иметь определённую дальность связи, а значит, требуется определённая мощность передатчика и чувствительность приёмника. Следовательно, при проектировании ЭС есть внешние параметры (т. е. исходные данные на разработку). Внешние данные диктуются системой высшего уровня и связаны с функциональными параметрами системы высшего уровня. В ответ на заданные внешние параметры при проектировании предлагаются схема и конструкция, которая характеризуется внутренними параметрами. Например, для приёмника-передатчика это требуемая мощность, чувствительность, исходя из заданной дальности связи. Соответственно, исходя из принципа системного подхода, предлагают два этапа: этапы внешнего и внутреннего проектирования.

На этапе **внешнего проектирования** решается задача обоснования исходных данных на разработку проектируемого изделия. Для этого анализируются системы высшего уровня и рассматривается связь этих исходных данных с характеристиками системы высшего уровня.

Целью **внутреннего проектирования** является синтез такой схемы и конструкции, которые имеют оптимальные внутренние параметры, наилучшим образом обеспечивая показатели качества. На этапе внутреннего проектирования задача создания конструкции решается в следующей последовательности:

1. Синтез схемы и структуры проектируемого изделия.
2. Оптимизация схемы и структуры, исходя из статистических данных разработки устройств подобного назначения.
3. Выбор наилучшего варианта схемы и структуры с учётом заданных ограничений на прочие показатели качества.

## 4.2. Роль и задачи конструктора при проектировании

Конструкция ЭС – совокупность элементов различных форм и свойств, определённым образом находящихся в пространстве, которые имеют механическую, электрическую, электромагнитную, тепловую связи. Связи обеспечивают надёжность, точность, стабильность функционирования в заданных условиях эксплуатации и обеспечивают возможность производства при заданных экономических требованиях в необходимом количестве изделий.

Процесс жизненного цикла конструкции состоит из следующих этапов:

- 1) возникновение идеи;
- 2) разработка электрических схем (схемотехническое проектирование);
- 3) разработка конструкции (конструкторское проектирование);
- 4) разработка технологического процесса (технологическое проектирование);
- 5) изготовление изделия;
- 6) эксплуатация изделия;
- 7) утилизация изделия.

Конструировать – значит разрабатывать конструкцию. Конструкторское проектирование включает в себя:

1. Размещение элементов на плоскости или в объёме.
2. Проектирование механических связей элементов, а именно несущие элементы конструкции и управляемые связи элементов – механизмы управления.
3. Проектирование элементов электромонтажа: печатных плат, проводного, кабельного монтажа. Оформление электромонтажных чертежей.
4. Проектирование электромагнитных устройств, в которых используются полезные электромагнитные связи. При этом конструктор решает задачу подавления паразитных электромагнитных связей и помех в проектируемом изделии до допустимых норм. Он проектирует электростатические и электромагнитные экраны, фильтры подав-

ления помех в проводах, уменьшает паразитные связи электро монтажа до допустимых норм.

5. Проектирование элементов локального и общего охлаждения, при котором конструктор рассчитывает и обеспечивает допустимый тепловой режим работы ЭС.

Проектируемая конструкция должна обеспечить выполнение заданных и общетехнических требований, должна учитывать требования конкретного производства и быть технологичной, т. е. может быть произведена в короткий срок при минимальных затратах.

В идеале задача конструктора заключается в выборе из бесконечно большого количества возможных вариантов конструкции наилучшего на время разработки конструкции варианта. Однако указанный выбор требует громадного времени (несколько лет, а иногда и десятков лет). При таком подходе к моменту создания конструкции она оказывается морально устаревшей, так как идет развитие элементной базы, появляются новые материалы и технические решения. На практике считается, что конструктор выполнил свою функцию, если ему удалось за ограниченное время создать более качественное изделие, чем аналогичное, и которое в течение нескольких лет не окажется морально устаревшим.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое система? Основные признаки системы.
2. Что относят к изменяемым в процессе проектирования ЭС факторам?
3. Что является ограничениями в процессе проектирования ЭС?
4. Этапы жизненного цикла электронных средств.
5. Какие задачи решаются на этапах внешнего и внутреннего проектирования ЭС?
6. Какие задачи решают на этапе конструирования ЭС?
7. Какой цели добивается конструктор электронных средств?

## 5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

### 5.1. Несущие элементы конструкции ЭС

Несущие элементы предназначены для крепления элементов конструкции в ячейках, блоках, устройствах ЭС. В зависимости от функциональной сложности изделия несущими конструкциями могут быть:

1. Шасси.
2. Каркасы оснований.
3. Печатные платы.
4. Рамки, теплоотводящие основания.

Несущие конструкции могут выполняться методом штамповки, либо литьём под давлением.

Штамповкой исполняют несущие конструкции из тонколистовых материалов. Под тонколистовыми материалами понимают прокат металлов толщиной до 4 мм. А литьём под давлением выполняют несущие конструкции малых и средних габаритных размеров из литейных сплавов.

Предпочтительно применять такие материалы, которые имеют высокий модуль упругости  $E$  при малой удельной массе  $\rho$ . Широко применяется алюминий и его сплавы АЛ-2, АЛ-9, АМг, АМц. Могут применяться конструкции из стали, ударопрочных пластмасс (полиамиды, стиропласты) в зависимости от назначения и условий эксплуатации аппаратуры.

Для авиационной аппаратуры наиболее часто применяются магниевые сплавы МА2, МА5, МА8.

В том случае, когда от несущего элемента требуется высокая электропроводность, могут применяться латуни ЛС59-1, Л63.

Для штампованных конструкций применяются также стали углеродистые и нержавеющей.

В настоящее время в качестве материала несущих конструкций широко используют пластмассы, например пенополиуретан (ППУ). В зависимости от состава ППУ могут быть жёсткими и эластичными, ударопрочными и даже демпфирующими.

При конструировании несущих конструкций необходимо обеспечить минимальную массу при заданной прочности. Для этого нужно выполнить рационально конфигурацию, форму несущей конструкции.

Несущие конструкции типа шасси применяются для одноэтажных конструкций, когда элементы конструкции размещаются в одной плоскости.

Для того чтобы обеспечить жёсткость тонколистового несущего элемента, предлагают его конструкцию с использованием отбортовки и выдавки.

Предпочтительно выполнять шасси коробчатой конструкции. В штампованных конструкциях шасси могут выполняться вырубкой отверстия различных конфигураций.

Для обеспечения точности исполнения деталей штамповкой при простановке размеров на чертеже за начало координат необходимо выбирать крайнее левое нижнее отверстие.

При простановке размеров и размерных цепей необходимо выполнить размерные цепи так, чтобы размеры, определяющие точность сопряжения детали, были указаны на чертеже с необходимой точностью погрешности исполнения.

Если же размер, определяющий точность сопряжения, оказывается замыкающим звеном размерной цепи, то его погрешность равна сумме погрешностей звеньев (рис. 5.1). В этом случае полученная точность исполнения размера может быть недостаточна для соединения с другими элементами. Погрешность на размер  $a$ , указанный на чертеже, будет равняться  $3 \cdot \Delta x$ .

Поэтому все размеры, определяющие точность крепления элемента (например панель, изображенная на рис. 5.2), должны быть проставлены от одной принятой базы с необходимой точностью исполнения каждого звена. Это требование должно выполняться при разметке крепежных отверстий деталей, а также при разметке посадочных мест многовыводных элементов на печатной плате (например микросхем, электрических разъемов).

Во втором случае допуск на межцентровое расстояние между крайними отверстиями окажется в 3 раза больше, чем в первом случае.

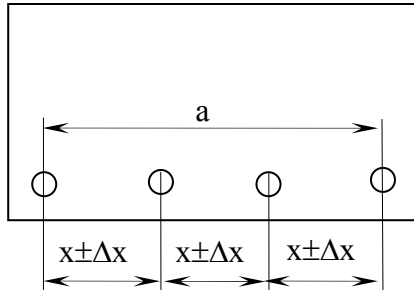


Рис. 5.1. Погрешность размерной цепи

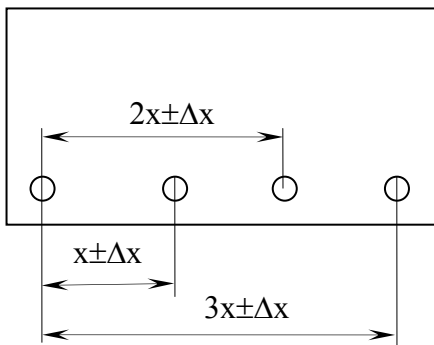


Рис. 5.2. Рекомендуемая простановка размеров

Допуск на крепёж детали винтами или болтами рассчитывается, исходя из разницы диаметра отверстия и диаметра винта и болта по формулам:

$$\Delta x = \frac{d_o - d_B}{2} \text{ — если одно направле-}$$

ние совмещения (отверстия расположе- ны в одну линию);

$$\Delta x = \frac{d_o - d_B}{3} \text{ — если два направле-}$$

ния совмещения (отверстия расположе- ны в плоскости).

**Каркасы оснований ЭС** предназна- чаются для многоэтажного размещения элементов конструкции и поэтому используются как несущие конструкции стоек, приборов и РТ устройств.

Для компактности и жёсткости кон- струкция чаще всего выполняется в фор- ме прямоугольного параллелепипеда с многоэтажным расположением элемен- тов на полках.

Такой каркас можно изготовить методами сварки или клёпки из уголков-профилей. Однако конструкция оказывается малотехноло- гичной, так как исполняется из большого количества уголков и со- держит много сварных соединений. Использование штамповки с по- следующей сваркой позволяет получить жесткую конструкцию, кото- рая оказывается достаточно технологичной и в тоже время прочной при эксплуатации (рис. 5.3).



Подобные конструкции можно исполнять достаточно жёсткими и из тонколистовых металлов за счёт уголкового профиля сечения. Высота полок отбортовки рекомендуется в значениях  $1/15 \dots 1/20$  максимального габаритного размера прибора.

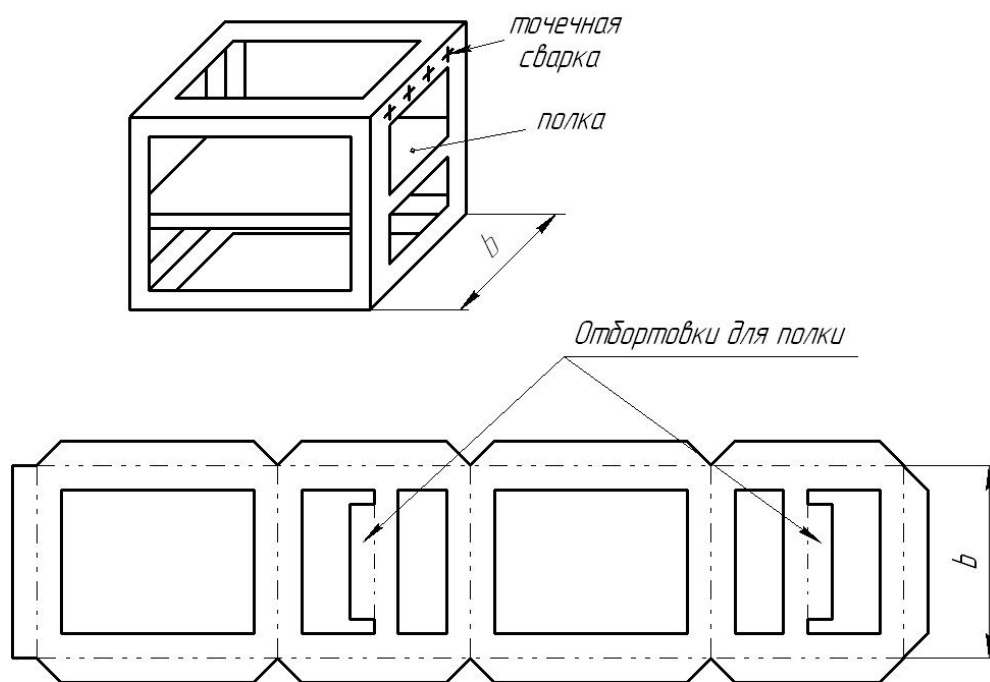


Рис. 5.3. Штампованный каркас и его развертка

**Рамки или теплоотводящие основания** используются как несущие конструкции ячеек ЭС. При выборе материала исходят из условия необходимой жёсткости или теплопроводности или того и другого. Если рамка используется как элемент жёсткости для ячейки, то она может выполняться литъём или штамповкой из материалов малой удельной массы, но достаточной прочности (алюминий, его сплавы, пластмасса).

Для минимальной массы, но достаточной жёсткости конструкции рекомендуется уголкового профиля сечения.

Несущая рамка может иметь поперечные либо продольные, или и поперечные, и продольные рёбра жёсткости, исходя из требуемой вибропрочности конструкции.

Печатная плата к рамке несущей может крепиться винтами или заклёпками, соответственно, в рамке предлагаются приливы с отверстиями крепления.

Несущая рамка выполняется вместе с элементами крепления ячейки в блок, например, петли для шарнирного крепления или передняя панель с невыпадающими винтами.

Если же несущая рамка должна выполнять функцию элементов локального охлаждения микросхем или транзисторов, то её изготавливают в виде теплоотводящего основания ячейки из материала высокой теплопроводности.

В теплоотводящем основании под микросхемами или транзисторами должно выполняться теплоотводящее дно толщиной, как требует микросхема или микросборка.

Толщина теплоотводящего дна может быть 0,5...1,8 мм в зависимости от типа корпуса микросхемы или микросборки. В зависимости от требуемой толщины дна теплоотводящего основания конструкция может быть штампованной, литой под давлением либо комбинированной.

Дело в том, что литьём под давлением нельзя исполнить очень тонкую стенку детали при большой площади отливки.

Если литьём моноконструкция с тонкой стенкой не получается, то можно сделать комбинированную конструкцию, когда к жёсткой несущей рамке припаивают отдельные тонкие теплоотводящие шины.

## **5.2. Особенности конструкций деталей, изготавливаемых литьём под давлением**

Литьём под давлением исполняют несущие конструкции и элементы ЭС малых и средних габаритных размеров, которые получают достаточно жёсткими с высокой чистотой поверхности.

При этом необходимо выполнять основные требования по конфигурации и размерам детали, исходя из особенностей литья под давлением.

Особенности конфигурации и размеров детали определяются уменьшением объёма и размеров детали при остывании её после литья.

При охлаждении имеет место усадка материала, а значит, и уменьшение размеров детали от 0,3...2 % в зависимости от литейного материала.

Исходя из особенностей процесса литья под давлением, при проектировании необходимо выполнять следующие требования:

1. Не допускается значительная разнотолщинность стенок детали в различных направлениях сечений. Допускается разнотолщинность стенок не более 30 % от толщины тонкой стенки. Для получения равнотолщинности делают выборку материала, например, уменьшают посадочную площадь фланца. На рис. 5.4 приведена конструкция фланца с выемками, кото-

рые уменьшают объем детали. Для того чтобы обеспечить прочность тонкостенной литейной детали, предлагают литейные рёбра жёсткости. При проектировании рёбер жёсткости тоже должны выполняться требования равнотолщинности ребра со стенками конструкции.

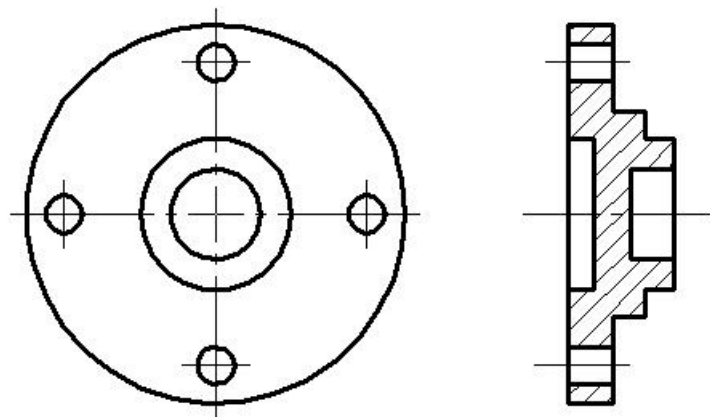


Рис. 5.4. Обеспечение равнотолщинности фланца

2. В конструкции литейной детали не должно быть острых углов, острых кромок, и при литье должны выполняться требования внешних и внутренних плавных сопряжений: радиусы внешних сопряжений примерно 0,8 мм, радиусы внутренних сопряжений примерно 1,5 мм. Эти требования указываются в технических требованиях чертежа.

3. Для того чтобы деталь не заклинило в форме после остывания, её стенки должны выполняться с технологическими уклонами  $15' - 1^\circ$  в зависимости от литейного сплава. Значения технологических уклонов указываются в технических требованиях чертежа.

4. Литьём под давлением ограничивается минимально исполняемая толщина стенок в зависимости от площади отливки и литейного сплава.

Таблица 5.1. Минимальная толщина стенок

| Площадь сплошной поверхности отливки, см <sup>2</sup> |      | Литьевой сплав |          |           |             |        |
|---|------|----------------|----------|-----------|-------------|--------|
|   |      | оловянные      | цинковые | магниевые | алюминиевые | медные |
| свыше   | до   |                |          |           |             |        |
| -   | 25   | 0,6            | 0,8      | 1,3       | 1           | 1,5    |
| 25  | 100  | 0,7            | 1        | 1,8       | 1,5         | 2      |
| 100   | 225  | 1,1            | 1,5      | 2,5       | 2           | 3      |
| 225   | 400  | 1,5            | 2        | 3         | 2,5         | 3,5    |
| 400   | 1000 | -              | -        | 4         | 4           | -      |

### 5.3. Особенности конструкции штампованных деталей в ЭС

Штамповкой получают детали из листового материала, которые отличаются высокой прочностью и жёсткостью при малой массе. Штамповка обеспечивает высокую производительность и соответственно малую стоимость изготовления детали. В основном изготавливаются несущие элементы конструкции – шасси, корпуса и кожухи ЭС, а также элементы крепежа – скобы, платы.

В качестве листовых материалов для штампованных изделий применяются металлические и неметаллические тонколистовые материалы.

Тонколистовым считается прокат толщиной до 4 мм. Используется для изготовления деталей несущих конструкций корпусов ЭС. Чаще всего применяется листовая прокат чёрных и цветных металлов следующих марок:

**1. Обычная углеродистая сталь 10 КП.** Обладает высокой пластичностью и вязкостью. Для улучшения обрабатываемости и снятия внутренних напряжений применяют термообработку (нагрев до 900 °С, быстрое охлаждение до 700 °С). Хорошо сваривается, при этом прочность сварного шва составляет 90 % от прочности основного металла. Хорошо окрашивается.

**2. Нержавеющая сталь 1X18H9T** (хромоникельтитановая). Кислотостойка, не подвержена коррозии в морской воде. Сталь хорошо сваривается, после соответствующей термической обработки допускает глубокую штамповку, жаростойка в атмосфере воздуха до 850 °С, почти не магнитна.

**3. Алюминиевые сплавы:** АМц (алюминиево-марганцевые), АМг (алюминиево-магниевые), Д16, В 95. Применяют, когда в технических требованиях задается минимальный вес. Конструкции весят в два с лишним раза меньше стальных.

Д-16 – алюминиево-медный сплав. Свойства: высокая прочность, хорошая пластичность, удовлетворительная свариваемость, но малая стойкость против коррозии, что заставляет плакировать прокат, т. е. покрывать его защитным слоем алюминия марки А-1. Все детали обычно подвергают анодированию и защитной окраске.

Алюминиево-марганцевый сплав АМц наиболее легированный и высокопластичный. Обладает высокой стойкостью против коррозии. Хорошо поддается гибке и вытяжке. Для снятия внутренних напряжений, полученных после обработки давлением, применяют отжиг при  $t$  350 – 410 °С с последующим охлаждением на воздухе. Хорошо поддается всем видам сварки.

Алюминиево-магниевые сплавы АМг в отожженном состоянии равны по прочности АМц. Хотя и не являются хладоломкими, но их пластические свойства значительно снижаются при наклепе.

Предел усталости несколько меньше, чем у алюминиево-марганцевых сплавов, что существенно для ограничения применения в устройствах, подверженных вибрациям.

АМг-6 имеет удовлетворительную пластичность и штампуемость, высокую антикоррозийную стойкость, особенно в морских условиях, хорошо сваривается контактной и аргонно-дуговой сваркой.

#### **4. Магниевые сплавы:**

МА-1 – в 1,5 раза легче алюминиевого сплава, но хуже коррозионная стойкость, пластичность.

ВМ 65-1 – высокая прочность, значительная пластичность, удовлетворительная стойкость к коррозии.

## 5. Латунь.

Латуни ЛС 59-1, Л-63, Л-68 – (медно-цинковые сплавы). Хорошо поддаются штамповке с глубокой вытяжкой, легко паяются, но недостаточно стойки против коррозии. В напряженных местах (изгибы, радиусы вытяжки) в тропических условиях растрескиваются.

Для изготовления штампованных деталей применяют две группы технологических операций: разделительные и формообразующие (рис. 5.5).

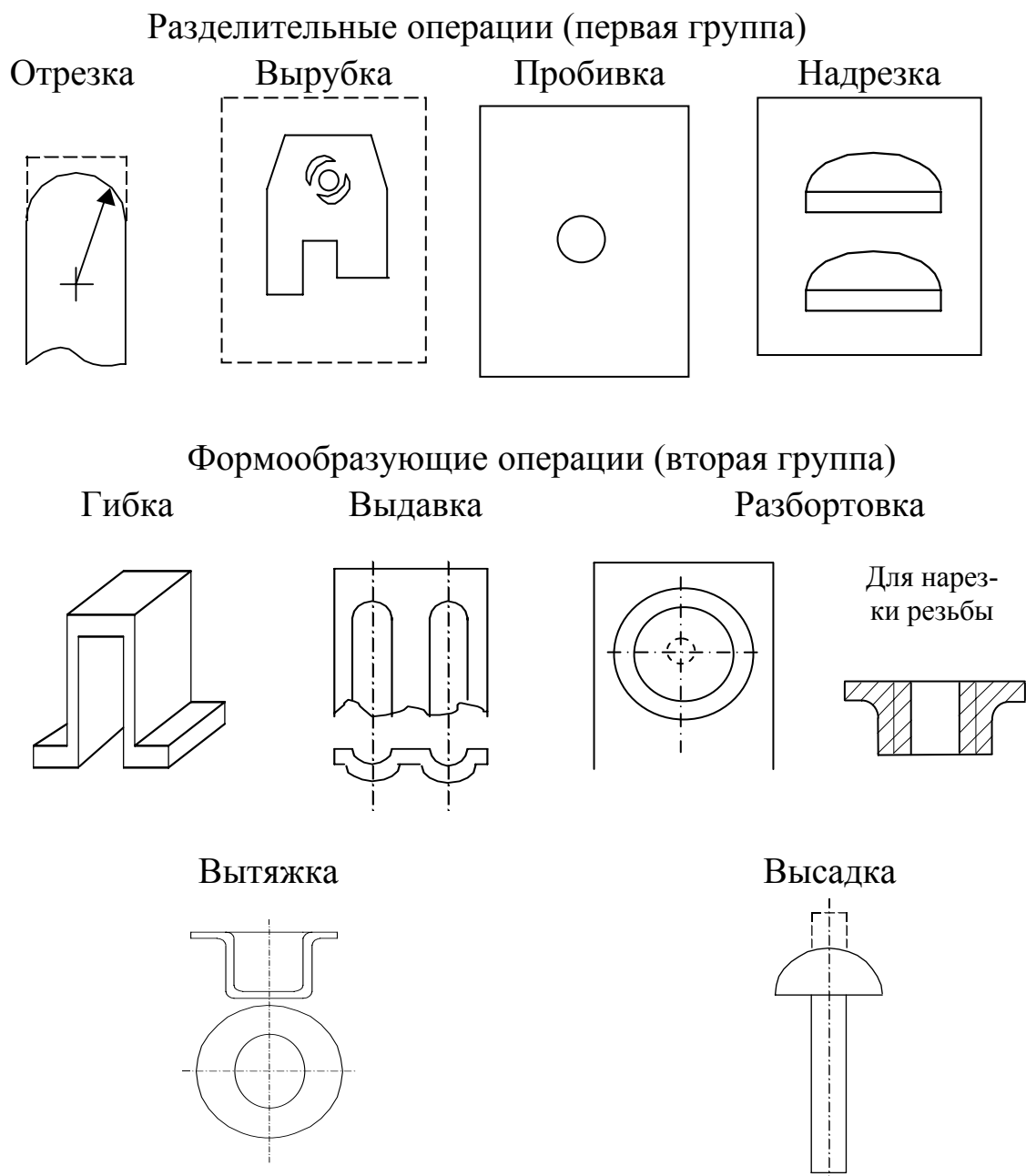


Рис. 5.5. Основные технологические операции изготовления штампованных изделий

Для заготовок, получаемых способом резки на гильотинных ножницах, нормально приемлемым является 7-й класс точности.

При вырубке или пробивке необходимо обращать внимание на допустимые к исполнению минимальные габаритные размеры вырубленной детали, которые находятся в соотношении с толщиной листа (рис. 5.6). Толщина листового материала под вырубку от 0,05 до 4 мм. При этом отношение ширины вырубленной детали к толщине должно быть не менее 3:1. Для различных выступов, перешеек и пазов допускается отношение 1,5:1.

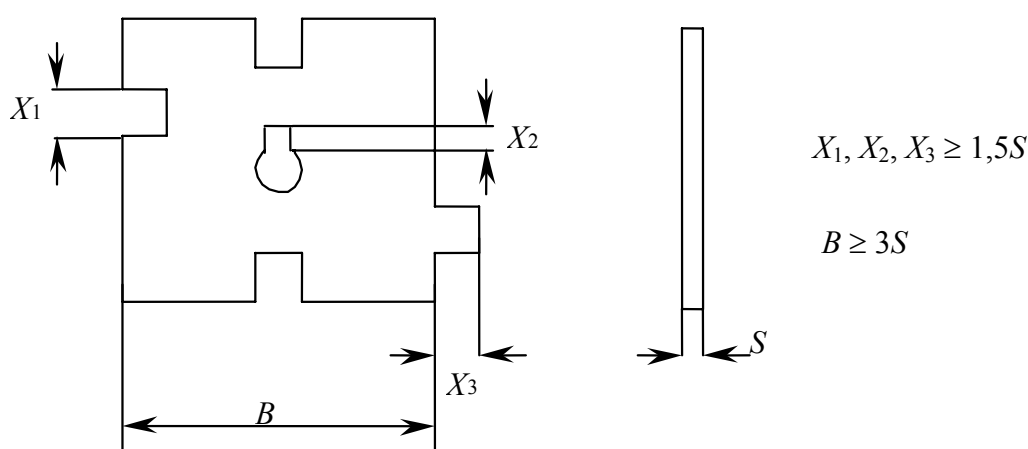


Рис. 5.6. Минимальные габаритные размеры вырубаемых деталей

Регламентируются также размеры минимальных отверстий, исполняемых вырубкой, которые зависят от толщины листа и материала (табл. 5.2).

Минимальные расстояния между пробиваемыми отверстиями и между отверстием и краем детали регламентируются на рис. 5.7.

Указанные соотношения – предельные с точки зрения допустимости по износу инструмента. По возможности целесообразно применять их увеличенными в 1,5 – 2 раза. Размеры отверстий приведены в миллиметрах.

Острые углы на деталях, изготавливаемых вырубкой, желательно скруглять. Минимальный радиус скругления зависит от материала и от толщины листа детали (рис. 5.8, табл. 5.3).

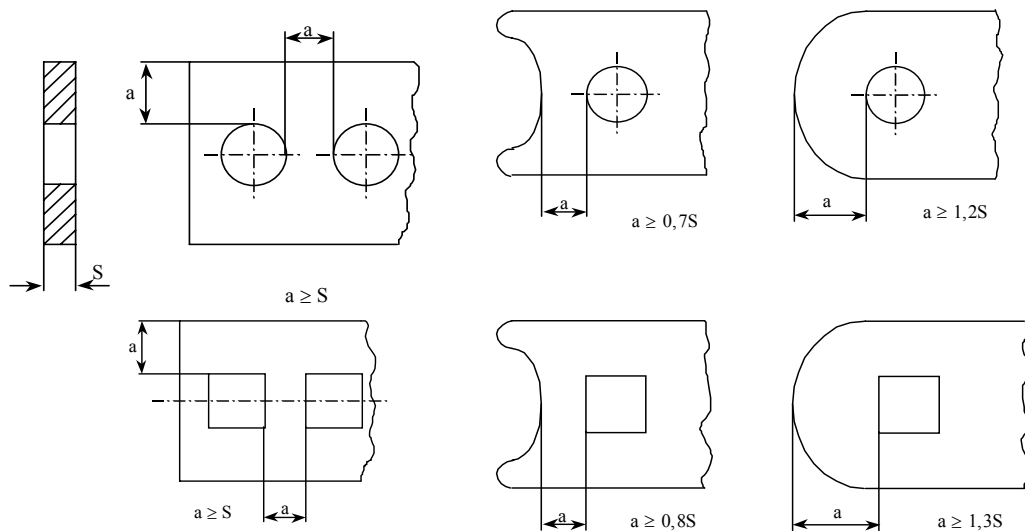


Рис. 5.7. Минимальные расстояния между пробиваемыми отверстиями и отверстием и краем детали

Таблица 5.2. Минимальные размеры отверстий

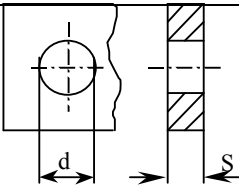
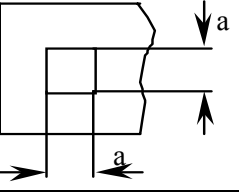
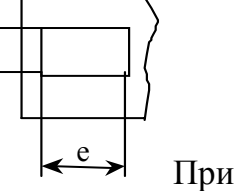
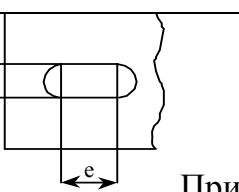
| Форма отверстий  | Материалы    |                |                  |                |                |
|--|--------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
|  | сталь        |                |                  | латунь         | алюми-<br>ний  |
|  | мягкая       | твердая        | нержа-<br>вующая |                |                |
|                           | $d \geq S$   | $d \geq 1,2 S$ | $d \geq 1,5 S$   | $d \geq 0,8 S$ | $d \geq 0,7 S$ |
|                           | $a \geq 0,9$ | $a \geq 1,1$   | $a \geq 1,4$     | $a \geq 0,7$   | $a \geq 0,6$   |
|  При $\frac{e}{a} \leq 3$ | $a \geq 0,7$ | $a \geq 0,9$   | $a \geq 1,2$     | $a \geq 0,6$   | $a \geq 0,5$   |
|  При $\frac{e}{a} \leq 3$ | $a \geq 0,8$ | $a \geq 1$     | $a \geq 1,3$     | $a \geq 0,65$  | $a \geq 0,55$  |



Таблица 5.3. Минимальный радиус закруглений, мм

| Материал               | Угол между сопрягаемыми сторонами, ° | Толщина материала |         |       |       |       |
|------------------------|--------------------------------------|-------------------|---------|-------|-------|-------|
|                        |                                      | 0,2 – 0,5         | 0,5 – 1 | 1 – 2 | 2 – 3 | 3 – 5 |
| Сталь мягкая           | ≥ 90                                 | 0,3               | 0,4     | 0,4   | 0,6   | 0,8   |
|                        | ≤ 90                                 | 0,5               | 0,7     | 0,7   | 1,1   | 1,5   |
| Сталь твердая          | ≥ 90                                 | 0,5               | 0,5     | 0,5   | 0,8   | -     |
|                        | ≤ 90                                 | 0,8               | 0,8     | -     | 1,5   | 2     |
| Латунь, медь, алюминий | ≥ 90                                 | 0,2               | 0,3     | 0,3   | 0,5   | 0,6   |
|                        | ≤ 90                                 | 0,3               | 0,5     | 0,5   | -     | 1,2   |

При вырубке и пробивке шероховатость поверхности среза получается в пределах 4 – 5-го класса чистоты. При необходимости получения лучшей чистоты 6 – 7-го класса применяют зачистку в штампах, что позволяет обеспечить точность изготовления детали по 3 – 4-му классу.

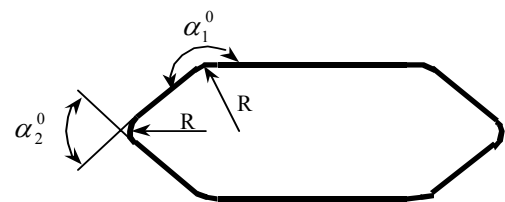


Рис. 5.8. Минимальные радиусы скругления

Расстояния между центрами отверстий, получаемых штамповкой, обеспечиваются в 2 раза точнее, чем расстояния от их центров до базовых поверхностей (рис. 5.9).

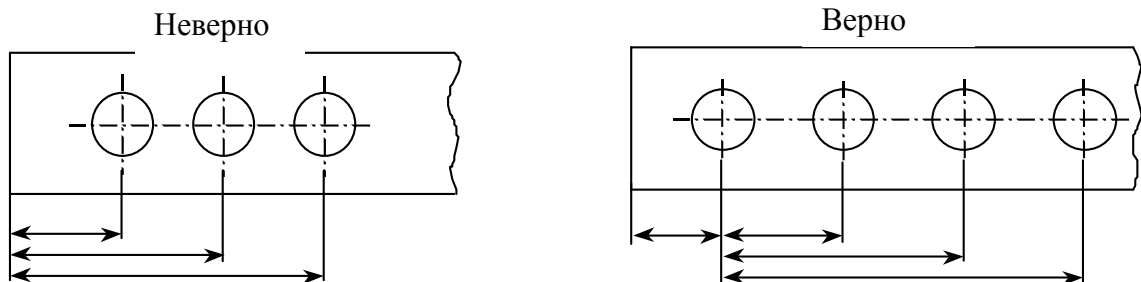


Рис. 5.9. Простановка расстояний между центрами отверстий

Гибка – распространенный метод получения объемных деталей из листового материала. При гибке узких полос происходит искажение поперечного сечения детали (рис. 5.10).

Утонение материала в месте гибки тем больше, чем меньше радиус изгиба. При малых радиусах увеличиваются внутренние напряжения в

сечениях изгиба, что может привести к трещинам. Поэтому минимальный радиус гибки  $R$  листового проката ограничивают значениями:

$$R = k_1 k_2 S,$$

где  $k_1$  – коэффициент, зависящий от марки материала и направлениягиба по отношению к направлению проката;

$k_2$  – коэффициент, зависящий от угла гибки;

$S$  – толщина листа.

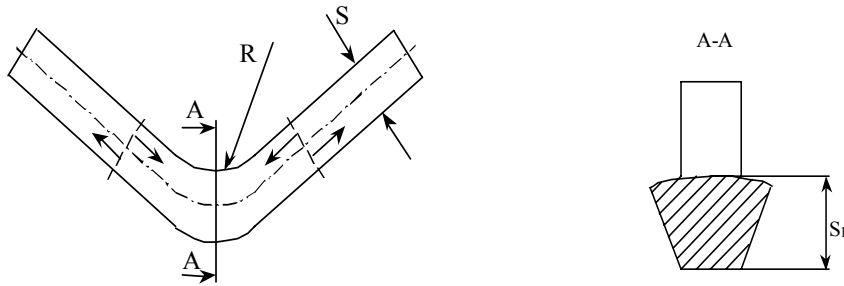


Рис. 5.10. Искажение поперечного сечения детали при гибке

Таблица 5.4. Значения коэффициента  $k_2$

|                         |          |     |     |
|-------------------------|----------|-----|-----|
| Угол гибки $\alpha$ , ° | 90 – 180 | 60  | 45  |
| $k_2$                   | 1        | 1,3 | 1,5 |

Утонение листового материала или утолщение при гибке полос на ребро находятся из соотношений рис. 5.11 и табл. 5.5.

Таблица 5.5. Утонение и утолщение листового материала при гибке

|                 |     |      |     |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{R}{S}$   | 0,1 | 0,25 | 0,5 | 1    | 2    | 4    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| $\frac{S_1}{S}$ | 0,7 | 0,8  | 0,9 | 0,95 | 0,98 | 0,99 | 1,12 | 1,08 | 1,06 | 1,05 |

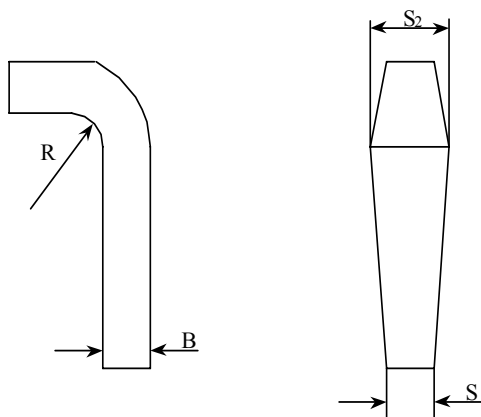


Рис. 5.11. Утонение и утолщение листового материала при гибке

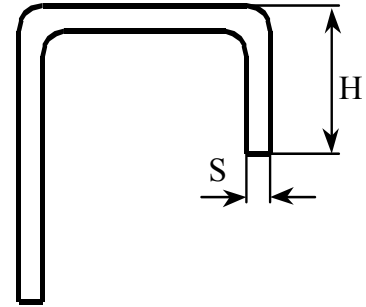
При гибке на ребро для алюминия, латуни, мягкой стали  $R_{\min} \geq 2,5 S$ .

При гибке труб диаметром до 20 мм  $R_{\min} \geq 1,5 D$ , где  $D$  – наружный диаметр трубы.

При гибке П-образных деталей размер полки

$$H_{\min} \geq 2 S.$$

При гибке плоских пластин для организации детали в форме параллелепипеда (кожухи, шасси, крышки) в местах гибки, в углах необходимо предусматривать технологические отверстия.



Если гибка выполняется с большим радиусом, то на развертке исполняются прорезы (рис. 5.12) и технологические отверстия (табл. 5.6).

Таблица 5.6. Рекомендуемые диаметры технологических отверстий

|          |     |   |     |   |
|----------|-----|---|-----|---|
| $S$ , мм | 0,6 | 1 | 1,5 | 2 |
| $d$ , мм | 3   | 4 | 5   | 6 |

Выдавка и отбортовка осуществляются с целью придания деталям большей жесткости, увеличения поверхности теплообмена, для крепления (рис. 5.13, табл. 5.7).

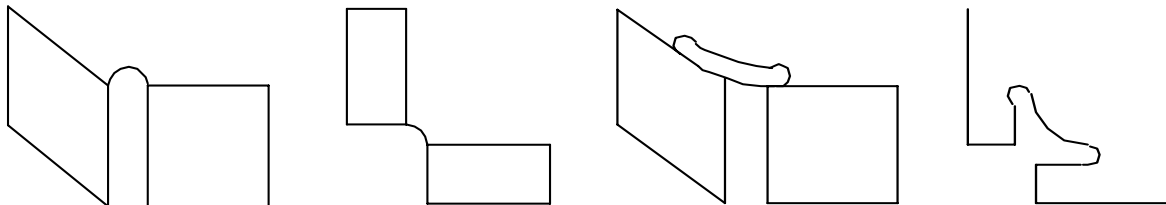


Рис. 5.12. Конфигурация прорезей при гибке с большим радиусом

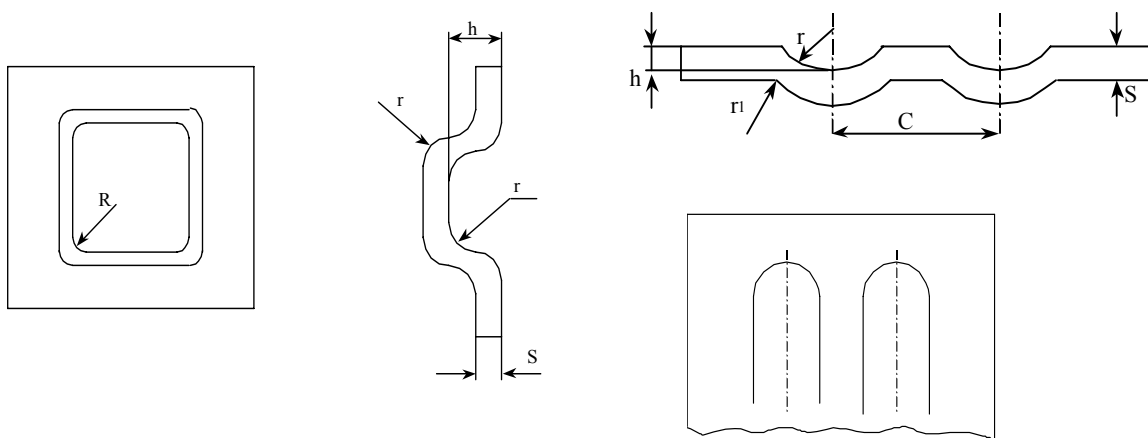


Рис. 5.13. Выдавка штампованных деталей

Таблица 5.7. Размеры элементов выдавки

| Размеры, мм     |             |             |     |
|-----------------|-------------|-------------|-----|
| $S \approx r_1$ | $r \pm 0,4$ | $h \pm 0,4$ | $C$ |
| До 0,5          | 2           | 1,6         | 10  |
| 0,5 – 0,8       | 3           | 2,5         | 16  |
| 0,8 – 1         | 4           | 3           | 20  |
| 1 – 1,6         | 5           | 4           | 25  |
| 1,6 – 2         | 6           | 5           | 30  |
| 2 – 2,5         | 7           | 6           | 36  |

#### 5.4. Несущие конструкции. Основы расчёта

Функцию несущих конструкций в электронных средствах выполняют печатные платы, рамки, теплоотводящие основания печатных плат, шасси, каркасы оснований. Несущие конструкции должны выдержать статическую нагрузку от элементов конструкции, кроме того, аппаратура, испытывающая вибрации и удары, должна выдержать динамические нагрузки. Для аппаратуры стационарной, не испытывающей ударов и вибрации, выполняют статический расчёт на нагрузку несущих от силы тяжести элементов:

$$P = M g ,$$

где  $M$  – масса элементов, установленных на несущей конструкции,  $g$  – ускорение свободного падения (в средних широтах  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ).

При наличии ударов и вибраций для аппаратуры подвижных объектов выполняют динамический расчёт с учётом перегрузок при ударах и вибрациях.

Динамический расчёт.

Сила, действующая на элементы конструкции  $F$  при внешних воздействиях, рассчитывается по формуле

$$F = M I ,$$

где  $I$  – ускорение при механическом воздействии.

Величину ускорения для различных условий эксплуатации ЭС задают в единицах ускорения свободного падения  $I = n g$ . Кроме того, выполняют конструкцию так, чтобы исключить резонанс в заданных значениях частот ударов и вибраций.

Рассмотрим статический расчёт несущих конструкций на примере определения диаметра ручек блока или прибора ЭС (рис. 5.14).

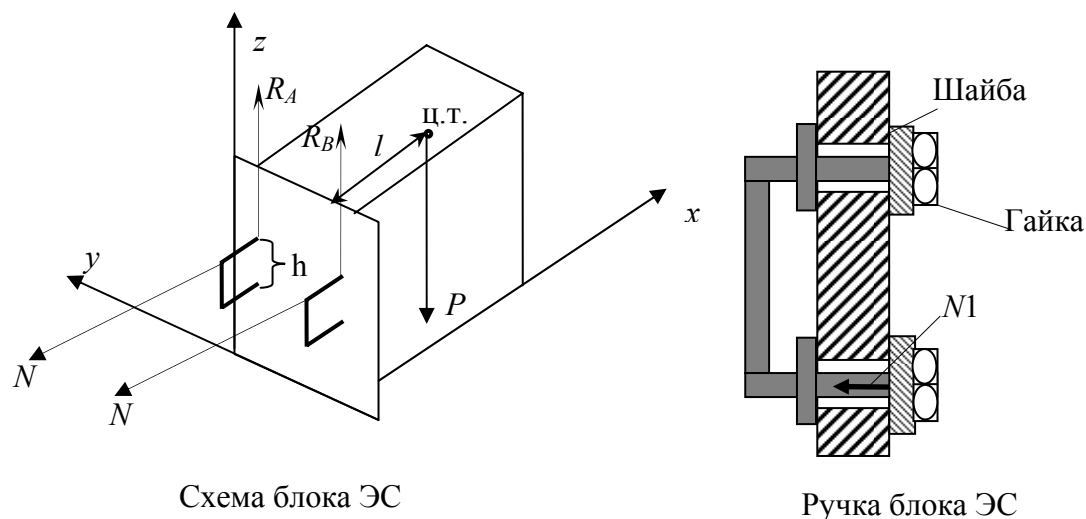


Рис. 5.14. Статический расчёт ручек блока ЭС

Цель расчёта – выбор материала и диаметра резьбового окончания ручек, исходя из нагрузки силы тяжести прибора.

Прибор нагружен с силой тяжести  $P = M g$ . Сила тяжести приложена к центру тяжести (на рис. 5.14 обозначен «ц.т.») прибора с координатами

$$y_{\text{ц.т.}} = \frac{\sum_{i=1}^m y_i M_i}{\sum_{i=1}^m M_i}, \quad X_{\text{ц.т.}} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i M_i}{\sum_{i=1}^m M_i}, \quad Z_{\text{ц.т.}} = \frac{\sum_{i=1}^m z_i M_i}{\sum_{i=1}^m M_i},$$

где  $M_i$  – масса  $i$ -го элемента конструкции прибора,  $x_i, y_i, z_i$  – координаты центра тяжести этих элементов по осям  $x, y, z$ ;  $m$  – количество элементов конструкции.

Для того чтобы выбрать диаметр резьбового окончания ручки, необходимо рассчитать силы реакций, приходящиеся на эти окончания. Для этого необходимо составить уравнение равновесия сил и моментов сил реакции в этих точках.

Опрокидывающий момент  $P \cdot l$ , где  $l$  – расстояние от центра тяжести до передней панели.

Момент удержания приборов в равновесии равен  $2N \cdot h$ , где  $N$  – сила реакции по оси задела ручки,  $h$  – высота ручки.

$$P \cdot l = 2 \cdot N \cdot h, \text{ отсюда } N = \frac{P \cdot l}{2 \cdot h}.$$

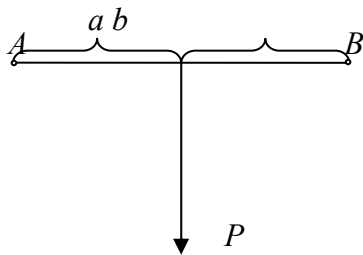
Чтобы прибор удерживался на заданном уровне, необходимо выполнить условие равновесия сил

$$P = R_A + R_B,$$

где  $R_A, R_B$  – силы реакции в точках  $A$  и  $B$ , направленные противоположно силе тяжести.

Если центр тяжести находится на пересечении осей симметрии прибора, то каждая сила определяется как  $R_A = R_B = \frac{P}{2}$ .

Если же центр тяжести смещён, то силы реакции в каждой точке определяются по формулам



$$R_A = P \frac{b}{a+b},$$

$$R_B = P \frac{a}{a+b}.$$

Для того чтобы ручка не перемещалась в отверстии передней панели, необходимо гайку ручки затянуть так, чтобы в соединении действовала сила  $N1$ , которая зависит от силы реакции  $R_A, R_B$  и коэффициента трения передней панели и шайбы соединения

$$N1 = \frac{R_A}{2f}, f - \text{коэффициент трения.}$$

Для пары трения сталь по стали  $f = 0,16 \dots 0,18$ . В итоге имеем результирующую силу, которая направлена по оси резьбового окончания ручки на разрыв ручки.

$$N_{\text{рез}} = N + N1.$$

Следовательно, в резьбовом окончании ручки возникают напряжения

$$\sigma = \frac{N_{\text{рез}}\beta}{\frac{\pi d_{\text{в}}^2}{4}} \leq [\sigma_{\text{доп}}],$$

где  $d_{\text{в}}$  – внутренний диаметр резьбы по канавке резьбового окончания ручки;

$\beta$  – коэффициент запаса на перетяжку резьбового окончания ручки;  
 $\beta = 1,5 \dots 2$ .

Возникающие напряжения должны быть меньше допустимых напряжений на разрыв выбираемого материала ручки  $[\sigma_{\text{доп}}]$ :

$$d_{\text{в}} \geq \sqrt{\frac{4N_{\text{рез}}\beta}{\pi[\sigma_{\text{доп}}]}}.$$

Через внутренний диаметр резьбы ручки рассчитывается наружный диаметр ручки и выбирается ручка под стандартную метрическую резьбу

$$d \geq \frac{d_{\text{в}}}{0,85}.$$

Подобная методика расчёта через уравнение равновесия сил и моментов сил применяется также для расчётов узлов крепления крупногабаритных элементов.

В случае наличия ударов и вибраций в динамическом расчете сила нагрузки от элементов увеличивается относительно силы тяжести в  $n$  раз. При этом, чтобы избежать резонансных колебаний при вибрационных воздействиях, несущие конструкции должны иметь собственную частоту механических колебаний выше верхней частоты возмущающих вибраций в  $1,5 \dots 2$  раза

$$f_0 \geq f_{\text{виб}}(1,5 \dots 2).$$

В случае плоской конструкции несущего элемента, например печатной платы с теплоотводящим основанием, собственная частота рассчитывается по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \frac{\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m'}}$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от способа крепления;

$a$  – длина плоской конструкции;

$D$  – цилиндрическая жесткость;

$m'$  – масса единицы площади поверхности.

Для того чтобы обеспечить необходимую вибропрочность таких несущих конструкций, необходимо увеличивать цилиндрическую жесткость  $D$  и уменьшать распределенную массу  $m'$ .

$$D = D_{\text{пл}} + D_{\text{тепл}}$$

где  $D_{\text{пл}}$ ,  $D_{\text{тепл}}$  – цилиндрические жесткости платы и теплоотводящего основания на плате.

Повысить жесткость платы и теплоотвода можно, увеличивая моменты инерции их сечений, так как цилиндрическая жесткость пропорциональна моменту инерции сечения.

Увеличить момент инерции сечения теплоотвода или плоской рамки можно выбором большей толщины пластины либо ее отбортовкой или ребрением.

Уменьшить распределенную массу  $m'$  можно, предлагая для несущей конструкции прочный, но легкий материал (алюминий и его сплавы, титан и его сплавы).

ЭС носимой аппаратуры, а также выносной вариант автомобильной аппаратуры должен быть ударопрочен при падении с высоты  $H = 500 \dots 750$  мм. При наличии ударных воздействий при падении аппарата корпус аппарата рассчитывается на силу соударения о грунт

$$Q_{\text{ср}} = M \frac{\vec{v}_H - \vec{v}_K}{\tau_{\text{и}}}$$

где  $\vec{v}_H = \sqrt{2 \cdot \vec{g} \cdot H}$  – начальная скорость аппарата в момент соударения с грунтом;

$v_K$  – конечная скорость отскока аппарата;

$$\vec{v}_K = -\vec{v}_H k;$$

$\tau_{\text{и}}$  – длительность ударного импульса (время соприкосновения с землей при ударе).



Коэффициент  $k$  зависит от жёсткости грунта и упавшего аппарата (для случая падения аппарата на сухой грунт  $k = 0,65$ ). Так как скорости  $v_n$   $v_k$  при указанном значении  $k$  разнонаправленны, то для скалярных значений скоростей получим

$$Q_{\text{ср}} = M \frac{v_1 + v_2}{\tau_{\text{и}}} = M \frac{k(1 + v_1)}{\tau_{\text{и}}} = M \frac{k(1 + \sqrt{2gh})}{\tau_{\text{и}}}.$$

Длительность ударного импульса  $\tau_{\text{и}}$  составляет сотые доли секунды. В этом случае ускорение при ударе о грунт достигает значений  $a = 100 \dots 120 g$ .

Элементы внутри аппарата при соударении о грунт испытывают меньшую силу нагрузки, чем корпус аппарата.

$$F_{\text{Э}} = m_{\text{Э}} a = \frac{m_{\text{Э}}}{M} Q_{\text{ср}},$$

где  $F_{\text{Э}}$  – сила действующая на элемент;

$m_{\text{Э}}$  – масса элемента.

### Контрольные вопросы

1. Что такое несущие элементы ЭС? В виде каких изделий они изготавливаются?
2. Какие материалы и методы изготовления используют для несущих конструкций?
3. Каким образом простановка размеров влияет на точность конструкции?
4. Как выбрать погрешность размеров?
5. Каковы требования к каркасам оснований?
6. Проектирование рамок и теплоотводящих оснований.
7. Особенности конструкций литых деталей. Литейные сплавы.
8. Особенности конструкций штампованных деталей.
9. Основные операции штамповки. Материалы, используемые для изготовления штампованных деталей.
10. Каковы минимальные размеры элементов штампованных деталей?
11. Цель и порядок расчета прочности элементов стационарной аппаратуры.
12. Цель и порядок расчета элементов ЭС, подвергающегося динамическим нагрузкам.

## 6. СИСТЕМА МЕЖСОЕДИНЕНИЙ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

### 6.1. Разновидности печатных плат

В настоящее время широко применяют печатный монтаж (рис. 6.1), который имеет следующие преимущества:

1. Компактность, высокая плотность монтажа.
2. Высокая технологичность, так как возможна автоматизация производства, что ведет к снижению брака.
3. Печатная плата исполняет роль несущего элемента и элемента электромонтажа.
4. Жесткость, виброударопрочность конструкции.

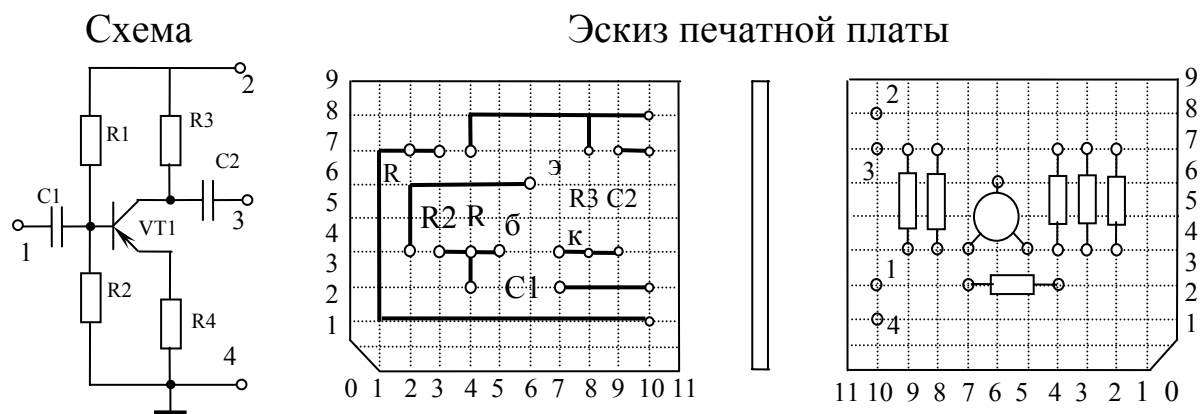


Рис. 6.1. Пример печатной платы

**Печатные платы (ПП) и конструкции на их основе различают:**  
**а) по технологии производства:**

1. Химический метод.

Сущность химического метода заключается в травлении фольги фольгированного диэлектрика согласно предварительно нанесенному рисунку печатных проводников и контактных площадок. Рисунок печатного монтажа обычно наносят через фотошаблон светом по пленке фоторезиста на фольгированной плоскости платы. На платах химического метода обычно исполняют односторонние конструкции, когда с одной стороны платы печатные проводники и контактные площадки, а с другой – устанавливаемые элементы.

2. Комбинированный.
3. Электрохимический.
4. Металлизация сквозных отверстий.

**б) по конструкции:**

1. Односторонняя.
2. Двухсторонняя.
3. Многослойная.

Точность производства и плотность монтажа печатных плат зависят от технологии производства. Существует 5 классов точности и плотности ПП (табл. 6.1).

Таблица 6.1. Минимальные размеры печатного монтажа

| Элементы печатного монтажа                                  | Размеры печатного монтажа, мм |      |      |      |       |
|---|-------------------------------|------|------|------|-------|
|   | 1                             | 2    | 3    | 4    | 5     |
| 1. Ширина проводников                                       | 0,75                          | 0,45 | 0,25 | 0,15 | 0,1   |
| 2. Расстояние между проводниками, контактными площадками    | 0,75                          | 0,45 | 0,25 | 0,15 | 0,1   |
| 3. Расстояние от края отверстия до края контактной площадки | 0,3                           | 0,2  | 0,1  | 0,05 | 0,025 |

Химический и комбинированный методы производства предполагают процесс травления фольги, а значит, не могут обеспечить точность выше 3-го класса. Чем выше требуемая точность производства платы, тем меньше допустимые её размеры.

Печатные платы 4, 5-го классов получают по аддитивным технологиям, т. е. электрохимическими методами наращивания проводников.

Если схема содержит микросхему с большой плотностью выводов, то могут предполагаться многослойные печатные платы.

Многослойная печатная плата представляет собой совокупность односторонних и двухсторонних плат (слоев) на тонком теплостойком диэлектрике, которые уложены в пакет и спрессованы при высокой температуре. Соединение проводящих слоев различных уровней выполняют с помощью сквозных отверстий металлизированных по всей длине и имеющих контактные площадки только тех уровней, которые соединяют.

В качестве тонкой теплопрочной основы может использоваться фольгированный диэлектрик с толщиной 0,06 – 0,12 мм.

Многослойная печатная плата (МПП) имеет пониженную надежность в производстве (брак) и при эксплуатации, поэтому идут по пути повышения точности и плотности монтажа, чтобы обойтись двухсторонней конструкцией.

## 6.2. Основные требования к проектированию печатного монтажа, трассировка и расчёты печатных элементов монтажа

При проектировании печатных плат и ячеек ЭС должны выполняться следующие **основные требования**.

1. При проектировании необходимо обеспечить минимальные размеры конструкции, а значит, максимальную плотность заполнения площади элементами.

Коэффициент заполнения площади элементами  $K_s = S_э/S_{\text{пл}} = 0,5...0,7$ .

Для конструкций с дискретными ЭРЭ  $K_s \geq 0,5$ .

2. Плата рекомендуется прямоугольной конфигурации, т. е.  $a/b < 3$ .

Каждая сторона ПП по своим размерам должна быть кратна шагу координатной сетки. Шаг координатной сетки – 2,5 мм.

Для точных и плотных плат на ИС применяют шаг координатной сетки 1,25, 0,5 мм.

Координатную сетку привязывают к началу координат: либо к левому нижнему углу платы, либо к левому нижнему отверстию. Координатная сетка по координатным линиям нумеруется либо по каждой линии, либо через несколько линий, но не более чем 4.

Допустимые к применению размеры ПП ограничивают в зависимости от величины платы:

1) если платы малых размеров:  $a \leq 100$  мм, то  $a, b = 2,5 \cdot n$ ;

2) если платы средних размеров:  $100 < a \leq 360$  мм, то  $a, b = 5 \cdot n$ ;

3) если платы больших размеров:  $a > 360$  мм, то  $a, b = 10 \cdot n$ .

Максимально допустимый размер платы:  $a = 470$  мм.

Для ячеек микроэлектронной аппаратуры из предложенного ряда размеров рекомендуют ограниченную выборку типоразмеров (для ЭС 12 типоразмеров).

3. В качестве материалов ПП выбирают материалы требуемой влагостойчивости и механической прочности в зависимости от условия эксплуатации.

1) Гетинакс фольгированный ГФ-1-35, ГФ-2-35. Этот материал гигроскопичен.

2) Стеклотекстолит фольгированный СФ-1-50, СФ-2-50. Материал влагоустойчив, механически прочный. Применяют в условиях эксплуатации с повышенной влажностью и виброударопрочностью. Для ОПП и МПП с  $h = 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3$  мм.

3) Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный СТФ-1, СТФ-2. Теплостойкий, имеет температуру до  $150$  °С. Для МПП и гибких ПП с  $h = 0,12; 0,15; 0,2$  мм и т. д. Большие значения толщины применяют для ОПП, МПП.

4) Фольгированный диэлектрик лавсановый ФДЛ-35, ФЛЛ-50  $h = 0,06-0,12$  мм. Применяют для МПП, гибких печатных кабелей.

4. ЭРЭ размещают так, чтобы выводы располагались в узлах координатной сетки.

ЭРЭ размещают рядами параллельно/перпендикулярно к сторонам платы. Длина печатных проводников должна быть минимальна, это значит, что соединяемые элементы с соединяемыми выводами должны размещаться рядом.

### **6.3. Особенности конструирования печатных плат с поверхностно-плоскостным монтажом компонентов**

Широко применяемый односторонний и двухсторонний монтаж компонентов платы, исполненных с проволочными выводами, имеет следующие недостатки конструкции:

- необходимость монтажных отверстий на плоскости платы;
- ограниченность возможности монтажа в двух плоскостях платы;
- потеря площади на монтажное поле под выводы элементов и снижение плотности упаковки.

Для выполнения ячеек ЭС по технологии поверхностного монтажа необходимо исполнить ПП из двухстороннего фольгированного текстолита по 3-му классу точности.

Технология поверхностного монтажа обладает рядом неоспоримых преимуществ:

- увеличение функциональной сложности на единицу площади;
- возможность полной автоматизации процесса сборки и монтажа;
- улучшение массогабаритных показателей.

Очевидно, что выбор типа поверхностно-монтируемого компонента (ТПМК) вполне обоснован. Так как элементная база для поверхностного монтажа представлена только в виде поверхностно-монтируемых компонентов – резисторов Р1-12 и конденсаторов К10-17в, то возможен для исполнения только вариант смешанного разнесенного монтажа, при котором компоненты для поверхностного монтажа располагают с одной стороны платы, а элементы с аксиальными (штырьковыми) выводами – с другой (рис. 6.2).

Такой вариант компоновки позволит заметно повысить плотность упаковки ПП и использовать согласно [16] пайку двойной волной припоя для монтажа как поверхностно-монтируемых компонентов, так и элементов со штырьковыми выводами. Для пайки волной используется припой ПОС 61 ГОСТ 21931-76.

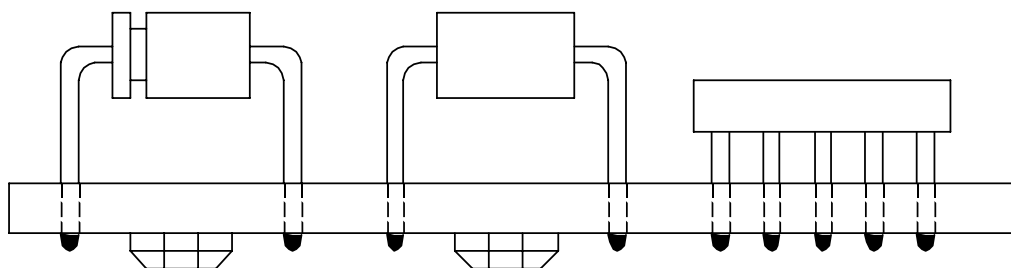


Рис.6.2. Поверхностный монтаж элементов с нижней стороны платы

Для обеспечения качественной пайки ТПМК-компонентов необходимо их размещать по возможности равномерно по всей плате. Существуют два способа ориентации ТПМК по отношению к направлению волны припоя (рис. 6.3).

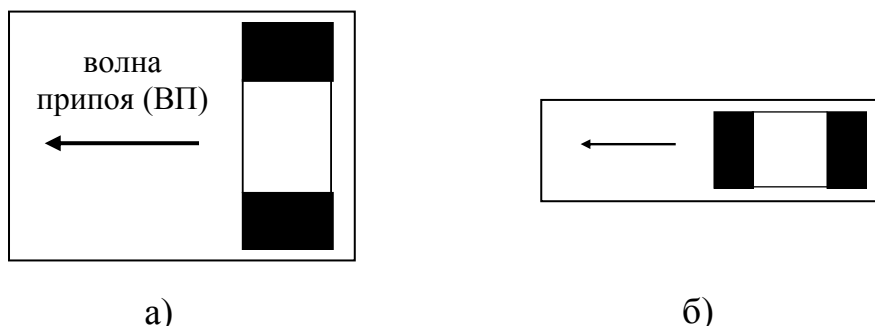


Рис.6.3. Ориентация ТПМК-компонентов

В случае, изображенном на рис. 6.3, б, может возникнуть непропай левого по рисунку вывода элемента из-за затенения корпусом элемента. Поэтому предпочтительный вариант показан на рис. 6.3, а. При очень плотной упаковке может возникнуть множество замыканий между ТПМ-компонентами (рис. 6.4,а). Для частичного предотвращения этого эффекта применяют «ловушки» припоя (рис. 6.4, б).

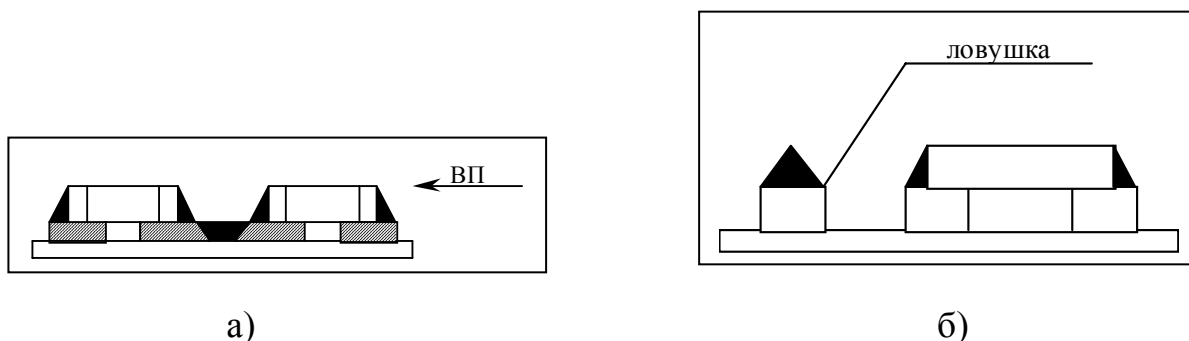


Рис. 6.4. Использование «ловушек» припоя

При использовании разновысотных ТПМК (вид сверху, рис. 6.5,а) их надо располагать на печатной плате так, чтобы со стороны движения волны припоя находился первым более низкий элемент (рис. 6.5, б). В противном случае (рис. 6.5, в) будет иметься непропай по причине затенения.

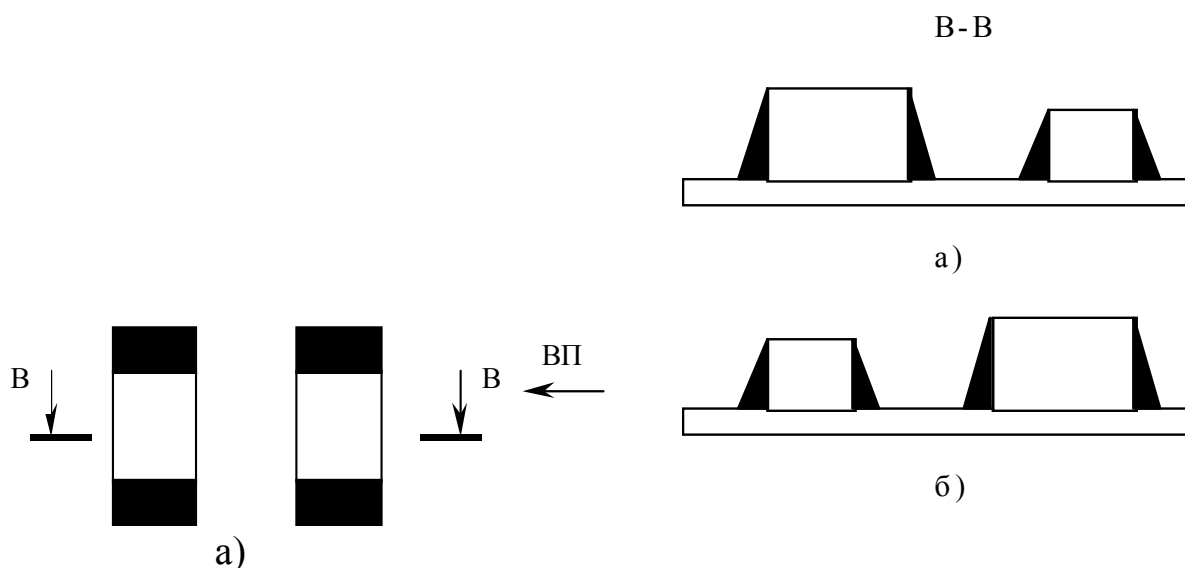


Рис. 6.5. Установка разновысотных элементов

При образовании общих контактных площадок у ТПМК их следует соединять узкими дорожками. Это связано с тем, что в силу дей-

ствий сил поверхностного натяжения элементы начинают смещаться по посадочному месту и возможно замыкание соседних не соединенных контактных площадок (рис. 6.6,*а* и 6.6,*б*).

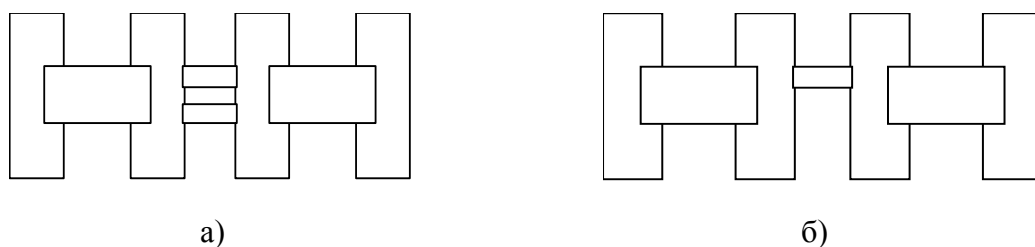


Рис. 6.6. Образование общих контактных площадок

Наиболее предпочтителен вариант, изображенный на рис. 6, *б*.

При формировании топологии лучше заменить широкую дорожку, проходящую под корпусом ТПМК, на несколько узких дорожек из-за возможности замыканий (рис. 6.7). Предпочтительный вариант показан на рис. 6.7, *б*.

При проектировании контактных площадок с переходными отверстиями необходимо делать заужение для предотвращения обеднения припоем места контактирования за счет стекания припоя вокруг отверстия в процессе пайки. Если же места не хватает, то необходимо исключить зауженную часть, а размер контактной площадки увеличить. Размеры на заданные участки контактных площадок можно найти в [34].

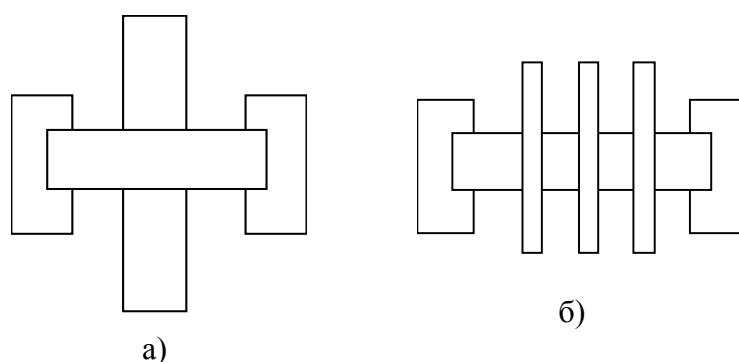


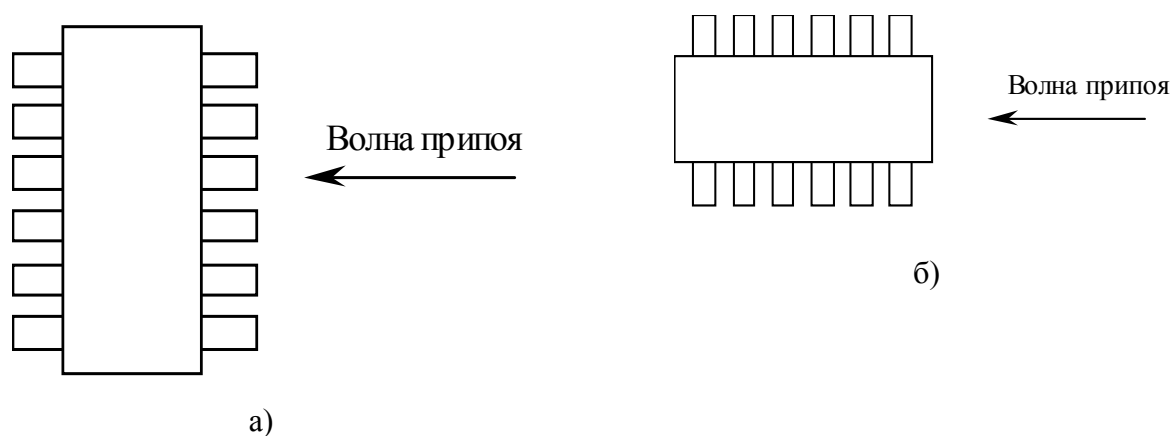
Рис. 6.7. Формирование топологии печатного монтажа

На ПП надо предусмотреть металлизированные монтажные отверстия для установки элементов со штырьковыми выводами. Зазор



между выводами обычных и ТПМ-компонентов должен быть не менее 1мм, а между выводом обычного компонента и коммутационной дорожкой – не менее 0,5 мм.

В составе схемы есть ИМС и фильтры с двумя рядами выводов. Возможны два способа ориентации рядов выводов этих элементов относительно волны припоя (рис. 6.8).



*Рис. 6.8. Ориентация ИМС относительно волны припоя*

В случае, показанном на рис. 6.8,б, возможны замыкания контактных площадок соседних выводов. Поэтому надо ориентироваться на применение варианта, изображенного на рис. 6.8,а. При этом будет обеспечено наилучшее качество пайки.

При разработке компоновочных вариантов печатного узла РПУ необходимо руководствоваться следующими требованиями на проектирование РПУ:

а) максимальный размер печатных плат 150х60 мм. Критерий оптимизации – уменьшение их ширины;

б) ориентацию, расположение и шаг выводов РПУ выполнить идентично с вариантом аналога блока РПУ. Компоновка ПП блока – аналога РПУ показана на рис. 6.9.

В результате была выполнена трассировка печатной платы с учетом всех требований и ограничений, оговоренных ранее. Удалось уменьшить ширину ПП до величины 40 мм, то есть примерно на 30 % от начального значения. Полученный результат весьма значителен.

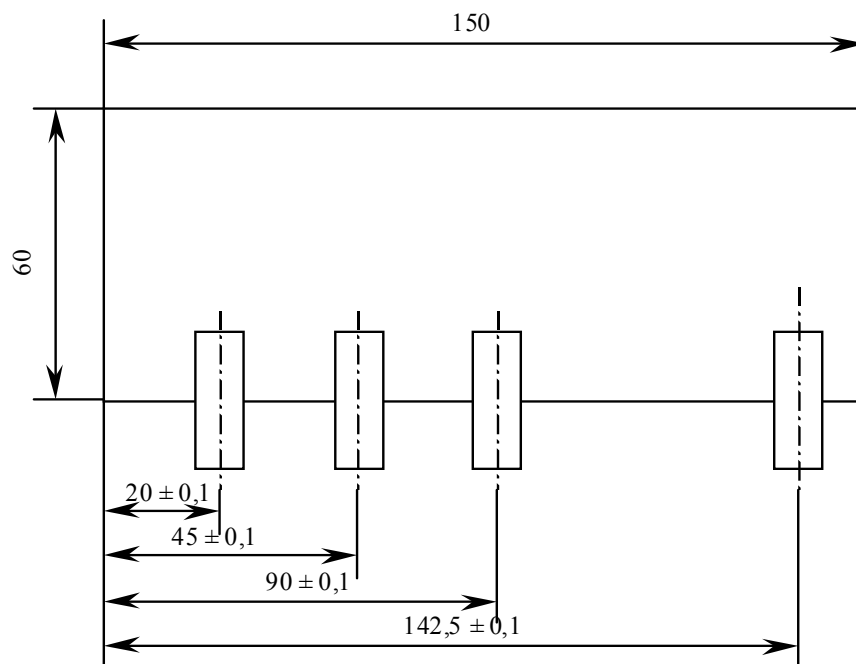


Рис. 6.9. Компоновка ПП блока – аналога

#### 6.4. Особенности оформления чертежа печатной платы

Печатная плата – деталь, а значит, на чертеже ПП должны быть обозначены все размеры, допуски на все размеры, шероховатости.

В наименовании чертежа в основной надписи отмечают “Плата печатная”, рекомендуемый масштаб 2:1.

Большую часть размеров оказывается возможным проставить на чертеже координатным методом, тонкими линиями типа “Выносных”, изображается координатная сетка. Координатная сетка привязывается к левому нижнему углу или левому нижнему крайнему отверстию, нумеруется. Шаг координатной сетки указывается в технических требованиях в чертежах.

$$h = 2,5; 1,25; 0,5 \text{ мм.}$$

Отверстия и контактные площадки ориентируются в узлы координатной сетки.

Отверстия близких значений диаметров изображаются окружностью одного диаметра. Отверстия одного диаметра на чертеже условно выделяются (рис. 6.10).

Отверстия под выводы ЭРЭ выбираются в зависимости от диаметра вывода ЭРЭ на 0,2 – 0,4 мм больше диаметра вывода.

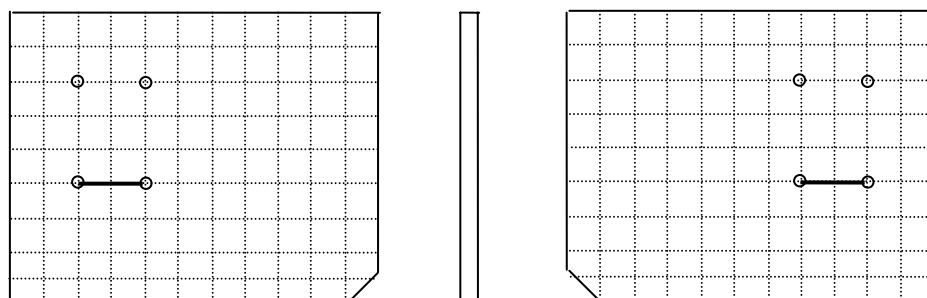
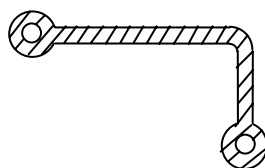


Рис. 6.10. Расположение отверстий на печатной плате

В конструкции рекомендуется ограничить количество типоразмеров отверстий до значений трех или четырех.

Контактные площадки и проводники на чертеже ПП могут изображаться двумя различными методами:

1) контактные площадки и проводники изображаются контурным очертанием со штриховкой:



2) контактные площадки и проводники изображаются упрощенно утолщенной линией толщиной в 2 “Контурные”.

В таком случае на чертеже должны быть указаны размеры контактных площадок, проводников и зазоров в технических требованиях.

Размеры элементов печатного монтажа рекомендуется отметить в таблице (табл. 6.2).

Таблица 6.2. Пример таблицы размеров отверстий

| Условные обозначения | Диаметр отверстия | Минимальный диаметр контактной площадки | Наличие металлизации | Кол-во отверстий |
|----------------------|-------------------|---|----------------------|------------------|
| ○                    | 1                 |   | Есть                 |                  |
| ◐                    | 1,2               |   | Есть                 |                  |
| ●                    | 3                 |   | Нет                  |                  |

Минимальный диаметр контактной площадки (рис. 6.11) рассчитывается с учетом выбранного класса платы и условиями производства

$$D_{\min} = d_0 + \Delta d_{\text{во}} + 2b_{\min} + \Delta t_{\text{во}} + \sqrt{T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{во}}^2},$$

где  $d_0$  – диаметр отверстия;  $\Delta d_{\text{во}}$  – допуск на диаметр отверстия (верхнее отклонение);  $b_{\min}$  – расстояние от края отверстия до края контактной площадки;  $\Delta t_{\text{во}(ho)}$  – допуск на ширину печатного проводника;  $T_D$  – позиционный допуск, погрешность в размещении контактных площадок;  $T_d$  – позиционный допуск, погрешность в размещении центров отверстий.

Для плат 3-го класса точности имеем следующие значения параметров,  $\Delta d_0$  зависит от  $d_0$ : если  $d_0 \leq 1$  мм,  $\Delta d_0 = \pm 0,05$  мм; если  $d_0 > 1$  мм,  $\Delta d_0 = \pm 0,1$  мм;  $b_{\min} = 0,1$  мм в 3-м классе.

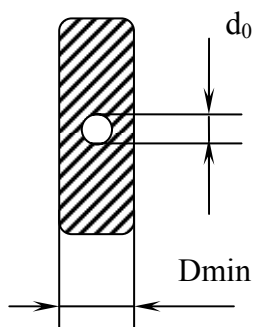


Рис. 6.11. Размеры контактной площадки

Погрешность ширины проводника  $\Delta t = \pm 0,1$  мм.

Если плата малая  $\ell < 180$  мм,  $T_d = 0,08$  мм;  $180 < \ell < 360$  мм,  $T_d = 0,1$  мм;  $\ell > 360$  мм,  $T_d = 0,15$  мм.

$$T_D = 2 T_d.$$

Для плат более грубых классов точности (1-й класс) погрешности параметров увеличиваются в 2 и даже в 3 раза. Информацию о размерах можно указать в технических требованиях или в виде таблицы (табл. 6.3).

Таблица 6.3. Пример таблицы размеров элементов печатного монтажа

| Элементы печатного монтажа                           | Размеры       |                |
|--|---------------|----------------|
|  | в узком месте | в широк. месте |
| 1) Ширина печатных проводников                       |               |                |
| 2) Расстояние между проводниками и контактными площ. |               |                |

**Ширина печатных проводников** рассчитывается от плотности тока.

В печатном проводнике плотность тока  $j_{\text{доп}} = 20$  А/мм<sup>2</sup>. В навесном монтаже с изоляцией плотность тока 10 А/мм<sup>2</sup>.

В зависимости от тока через проводник ширина проводника рассчитывается по формуле

$$j = I / (t \cdot \delta), t = I / (\delta \cdot j_{\text{доп}}),$$

где  $t$  – ширина проводника;  $\delta$  – толщина проводника.

Если  $\delta = 50$  мкм, то на каждый ампер тока необходимо 1 мм ширины проводника. Если токи схемы малые, то ширину проводника выбирают, исходя из возможностей производства: в узком месте по минимальному значению в выбранном классе; в свободном – предыдущего грубого класса.

**Расстояние между проводниками** и контактными площадками выбираются из напряжения между ними (табл. 6.4).

Таблица 6.4. Минимальное расстояние между элементами печатного монтажа в зависимости от напряжения

|                |      |      |      |     |     |     |     |     |
|----------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Расстояние, мм | 0,15 | 0,25 | 0,45 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| Напряжение, В  | 20   | 30   | 100  | 125 | 150 | 175 | 200 | 250 |

Если напряжения малые, то зазор выбирают, исходя из возможностей выбранного класса точности.

При размещении трасс печатного монтажа необходимо выполнять следующие требования: длина печатных проводников должна быть минимальной, а значит, соединяемые элементы с соединяемыми выводами должны размещаться рядом.

Если проводники в узком месте при трассировке могут пересекаться, что не положено схемой, то узкое место можно развести следующими методами.

1. Печатный проводник в узком месте прерывается, предлагаются монтажные отверстия, проводник исполняется с другой стороны навесным проводом (перемычка). Количество проводников-перемычек должно быть минимально.

2. Предлагается рациональная компоновка элементов, когда трасса в узком месте проходит между выводами элементов.

3. Печатный проводник может размещаться не только по линиям координатной сетки, но и между линиями, и под углом, кратным  $15^\circ$ .

4. Допускаются произвольные конфигурации печатного монтажа.

### ***Основные требования установки радиоэлементов на печатные платы. Особенности оформления сборочных чертежей изделий на печатных платах***

Навесные электрорадиоэлементы на печатной плате размещают в соответствии с ОСТ 4.010.030-81. Навесные элементы с планарными выводами допускается располагать с двух сторон печатной платы. Корпуса элементов размещаются параллельно сторонам печатной платы. Расстояние между корпусом элемента и краем печатной платы должно быть не менее 1 мм, а между выводом элемента и краем печатной платы не менее 2 мм. Расположение элементов должно обеспечивать наиболее простую трассировку, технологические требования к ячейке для автоматической сборки, пайки и контроля, высокую надежность, малые габаритные размеры, быстродействие, теплоотвод, ремонтпригодность и др.

Расстояние между неизолированными корпусами, между корпусами и выводами соседних электрорадиоэлементов должно быть не менее 1 мм, допускается уменьшение расстояния между изолированными корпусами до 0,5 мм. Минимальный шаг установки микросхем приводится в ОСТ 4.010.009.

Для автоматической установки навесных элементов должны быть предусмотрены "свободные" зоны, занимаемые исполнительным механизмом установочной головки автоматизированного оборудования. Размеры "свободных" зон, перечень ЭРЭ, подлежащих автоматизированной установке на печатную плату, а также требования к конструкции ПП приведены в ОСТ 4.091.124-79.

ОСТ 4.010.030-81 определяет возможные варианты расположения элементов и формовки их выводов.

Варианты установки элементов обозначаются буквенно-цифровым кодом: цифра обозначает вариант расположения элемента на плате, буква обозначает вариант формовки выводов. Установочные размеры для элементов выбираются кратно шагу координатной сетки: 2,5, 1,25 и 0,5 (0,625) мм. Варианты установки приведены в табл. 1.3, ОСТа.

Элементы по вариантам I (а, б) устанавливаются на платах с односторонним и двухсторонним расположением печатных проводников, имеющих электроизоляционную защиту печатных проводников и металлизированных отверстий под электропроводными корпусами ЭРЭ.

Элементы по вариантам II (а, б, в, г) и III устанавливаются на платах с односторонним и двухсторонним расположением печатных проводников.

Вариант IV применяется в двухплатной конструкции печатного узла с односторонним и двухсторонним расположением печатных проводников.

Полупроводниковые приборы по вариантам, V (а, б, в, г) устанавливаются на платах с односторонним и двухсторонним расположением печатных проводников. При двухстороннем расположении печатных проводников под элементом, установленным по варианту Va, предусмотреть изоляцию, если под элементом проходит проводник или расположено металлизированное отверстие.

Варианты установки VI (а, б, в), VII (а, б, в), VIII (а, б) применяются на платах с односторонним и двухсторонним расположением печатных проводников. При расположении печатных проводников и металлизированных отверстий под корпусами микросхем и микросборок, установленных по варианту VIa, необходимо предусмотреть электроизоляционное покрытие. Варианты установки VIв и VIIIб рекомендуются при применении теплоотводящих шин или электроизоляционных прокладок.

Варианты IX (а, б, в, г) применяются для установки реле на платах с односторонним и двухсторонним расположением печатных проводников.

На сборочном чертеже модуля на печатной плате допускаются упрощенные изображения навесных элементов, которые должны соответствовать ОСТ 4.010.030. Печатные проводники на сборочном чертеже разрешается не показывать, а монтажные отверстия изображать одной окружностью или пересечением линий координатной сетки. На чертеже обозначаются поверхности разъемов, монтажных лепестков и других деталей, предохраняемые от попаданий на них лака. На ЭРЭ должны быть указаны позиционные обозначения в соответствии с принципиальной электрической схемой. Маркировка на ЭРЭ показывается условно без нанесения ее на корпус ЭРЭ, что должно оговариваться в технических требованиях сборочного чертежа.

В технических требованиях чертежа необходимо указывать варианты установки ЭРЭ в соответствии с ОСТ4.010.030-81:

а) для случая установки элементов по одному варианту – "Установку элементов производить по ОСТ4.010.030-81. Шаг координатной сетки ... Вариант установки ...";

б) для случая установки элементов по разным вариантам "Установку элементов производить по ОСТ4.010.030-81. Шаг координатной сетки ... Элементы ( $R1$ ,  $C1$  и т.д.) устанавливаются по варианту ..., элементы ( $R2$ ,  $C2$  и т.д.) устанавливаются по варианту ...";

Установка ЭРЭ, не вошедших в стандарт, и ЭРЭ с установочными размерами, отличными от приведенных в стандарте, должна быть показана на поле чертежа.

В технических требованиях необходимо указать марку припоя, покрытие для влагозащиты.

## 6.5. Проводные и кабельные линии связи

В качестве элемента электрической коммутации при объемном монтаже широко используют медную проволоку как без внешней изоляции, так и изолированную (электрический провод). При построении линий связи используют как минимум два проводника. В настоящее время в качестве электрических линий связи широко используют витую пару, коаксиальные кабели и плоские ленточные кабели.

### *Витая пара*

Основные типы линий связи можно разделить на два крупных класса: линии, в которых обеспечиваются плоскопараллельность сечения и картины электромагнитного поля (до определенных условий),

и линии, в которых отсутствует плоскопараллельность ЭМП. Витая пара образует второй класс, остальные – первый.

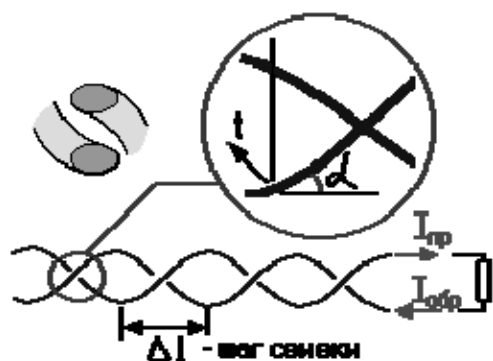


Рис. 6.12. Витая пара

Витая пара (рис. 6.12) выполняется либо самостоятельно, либо входит в состав других кабелей. В зависимости от способов подключения обратный проводник заземляется с одного или с двух концов.



Особенности витой пары:

- система векторов электрического и магнитного полей неплоскопараллельна, проводники находятся под некоторым углом  $\alpha$  к нормали плоскости сечения. В сечении проводов витой пары видим эллипс, а не окружность. Из этого следует, что силовые линии электрического поля, которые перпендикулярны поверхности проводника, не лежат строго в плоскости сечения.

- Витая пара отличается минимальной восприимчивостью к внешним магнитным полям. Это объясняется следующим. При воздействии внешнего магнитного поля на витую пару в каждом витке индуцируется ток, значение которого пропорционально площади витка. Поскольку площади витков практически одинаковы, то и наведенный ток в витках одинаков по амплитуде и по направлению. За счет изменения направления проводов от витка к витку при свивке наведенные токи в паре витков компенсируют друг друга. Таким образом, при четном количестве витков суммарный наведенный ток будет равен нулю, а при нечетном – равен наведенному току в одном витке.

Кроме отмеченной особенности, витая пара отличается повышенным волновым сопротивлением, что является положительным качеством. Все это определяет широкое применение витой пары для создания компьютерных сетей.

### **Коаксиальный кабель**

Коаксиальный кабель (рис. 6.13) представляет полностью экранированную линию, но качество экранирования определяется конструкцией оплётки или наружного проводника.

Для оплётки качество будет зависеть от плотности переплетения медной проволоки.

Параметр "оптическая плотность" определяет процент площади вокруг сигнального проводника, занятой проволокой оплётки. Например, значение плотности  $S = 90\%$  означает, что  $90\%$  плоскости оплётки занято проволокой, а  $10\%$  – это зазоры. Диапазон оптической плотности составляет в общераспространённых случаях  $80 - 90\%$ . Для высокостабильных кабелей вместо оплётки применяется сплошной (как правило, медный) трубчатый проводник. Очевидно, что оптическая плотность при этом составляет  $100\%$ .

Микрокабели применяются при изготовлении коммутационных плат типа "УНИШИЛД". Технология аналогична стежковому монта-



Рис. 6.13. Коаксиальный кабель

жу, но вместо изолированного проводника применяется микрокабель, после чего со стороны соединений печатная плата покрывается медью (поверх оплётки кабелей), что позволяет образовать общую шину заземления. Понятно, что здесь задействованы высокие технологии и изготовление такой платы дело довольно дорогостоящее.

### Плоские ленточные кабели

Самый распространённый пример плоского кабеля – компьютерные шлейфы. В плоских кабелях локализация электромагнитного поля проводится за счёт ряда проводников, имеющих функцию экрана

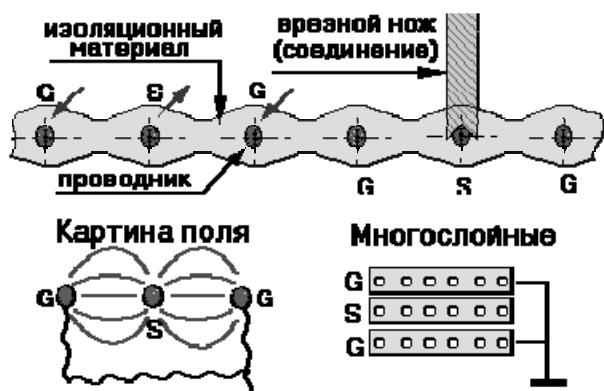


Рис. 6.14. Структура плоских ленточных кабелей

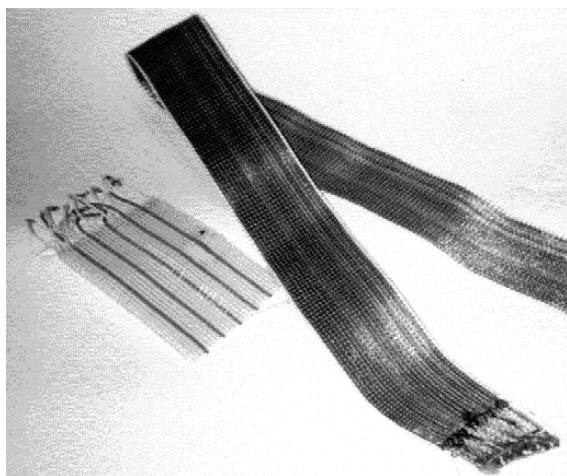


Рис. 6.15. Плоские ленточные кабели

(рис. 6.14, 6.15). Наиболее типична структура ЭКРАН-ПРОВОДНИК-ЭКРАН, или **G-S-G** (Земля-Сигнал-Земля). Картину поля системы двух проводников построить несложно. В случае необходимости применяют многослойные конструкции, в которых внешние слои представляют заземлённые проводники и выполняют роль экрана.

Соединения в плоском кабеле выполняются при помощи специальных контактных устройств (рис. 6.14), которые позволяют прорезать изоляцию и механически контактировать с проводником.

### 6.6. Волоконно-оптические линии связи

Волоконно-оптические линии связи обеспечивают связь между передатчиком и приемником в оптическом диапазоне (свет) волн ( $\lambda = 0,85; 1,3 - 1,6$  мкм) в соответствии со структурной схемой рис. 6.16.

Преимущества:

1. Высокая помехоустойчивость, нечувствительность к внешним электромагнитным полям.

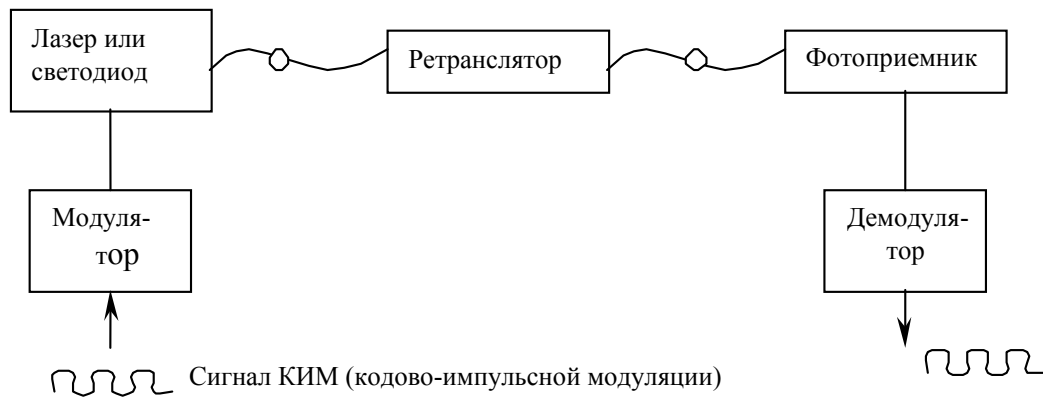


Рис. 6.16. Структурная схема волоконно-оптической связи

2. Значительно большая широкополосность и быстродействие.
3. Малые масса и габаритные размеры.
4. Полная электрическая изоляция между входом и выходом.
5. Отсутствие коротких замыканий, а значит, могут прокладываться в пожароопасных и химических зонах.
6. Потенциально низкая стоимость, так как изготавливаются из стекла.

### Типы световодов

Для передачи электромагнитной энергии по световоду используется известное явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектрических сред. Простейший световод представляет собой круглый или прямоугольный диэлектрический стержень, называемый сердечником, окруженный диэлектрической оболочкой (рис. 6.17).

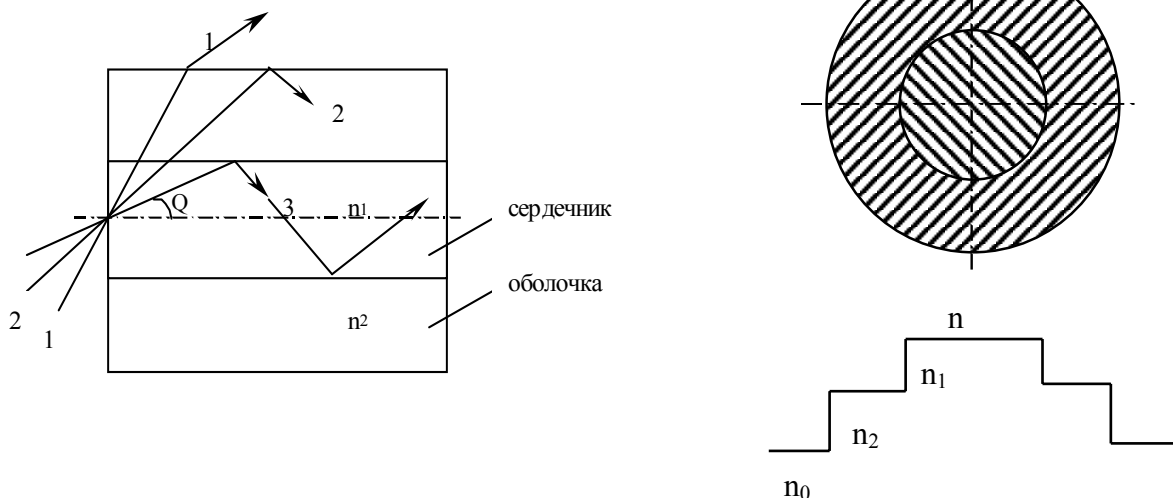


Рис. 6.17. Принцип работы световода

Коэффициент преломления  $n_1 > n_2$ .

В зависимости от угла  $Q$  имеют место волны излучения 1, волны оболочки 2, волны сердечника 3.

Если угол падения меньше некоторого критического угла  $\theta_{кр}$ , то луч полностью отражается на границе сердечник – оболочка и остается внутри сердечника (луч 3).

Оболочка защищает распространяющийся по сердечнику свет от любых внешних воздействий и помех.

В качестве волокна обычно используется кварц, кварц-полимер или многокомпонентные стекла. Когда диаметр сердечника составляет десятки микрометров, диаметр оболочки – сотни микрометров.

Могут быть световоды, состоящие не из двух компонент со ступенчатым профилем коэффициента преломления, а из одного материала с изменяющимся коэффициентом преломления. Если показатель преломления от центра к краю волокна изменяется не ступенчато, а плавно, то такие световоды называются с градиентным профилем показателя преломления, или градиентными световодами.

Лучи в градиентном световоде изгибаются в направлении градиента показателя преломления (вместо преломления) (рис. 6.18).

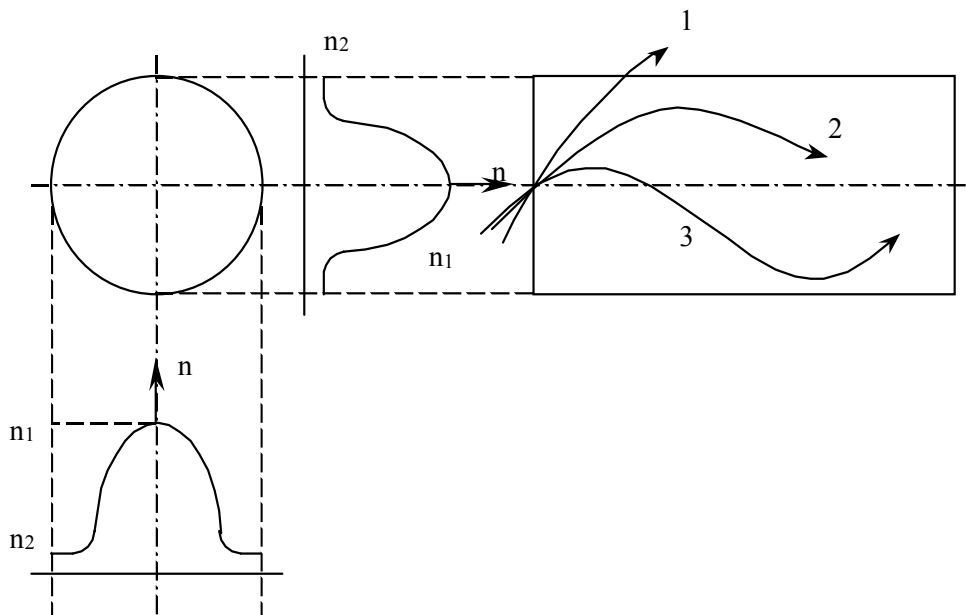


Рис. 6.18. Принцип работы градиентного световода

Световоды, используемые в интегральной оптике (рис. 6.19), изготавливаются обычно в виде планарной пленки или полоски с показателем преломления выше, чем у подложки.

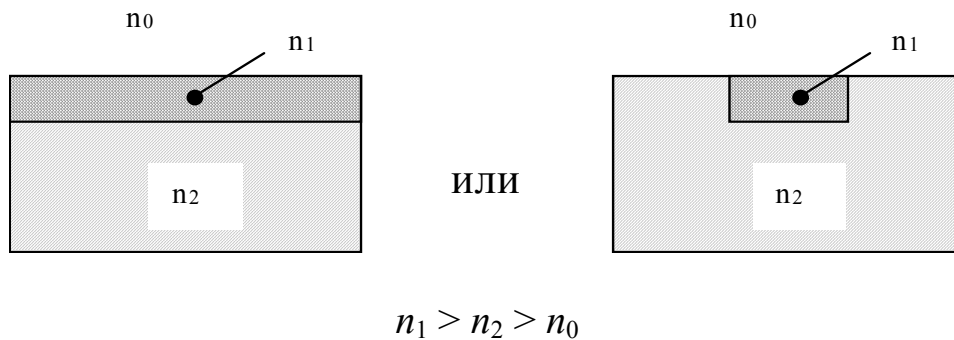


Рис. 6.19. Конструкция интегрального световода

### **Оптические кабели**

Оптические кабели (ОК) по своему назначению можно классифицировать на 4 группы:

- 1) междугородные;
- 2) городские;
- 3) объектовые;
- 4) подводные.

Междугородные кабели предназначены для передачи информации на значительные расстояния, должны обладать малым затуханием и большой информационно-пропускной способностью.

Городские оптические кабели используются для связи в городе между АТС и узлами связи, работают, как правило, на малых расстояниях (5 – 10 км) без регенераторов.

Объектовые ОК используются для передачи информации внутри объекта: видеотелефонная связь, сеть кабельного телевидения, бортовые сети (самолет и т.п.).

Подводные ОК применяют для связи под водой на больших расстояниях. Они должны обладать высокой механической прочностью и иметь надежное влагостойкое покрытие, малое затухание, большие длины регенерационных участков.

Конструкция оптических кабелей зависит от количества передаваемой информации (числа каналов), условий эксплуатации по механическим нагрузкам и влажности. Можно выделить следующие 3 характерные типовые конструкции ОК (рис. 6.20):

- 1) повивной скрутки;
- 2) с фигурным сердечником;
- 3) ленточного типа.

Силовые элементы (СЭ) необходимы для обеспечения прочности ОК, уменьшения его деформации. СЭ могут быть в центре конструкции, по периметру (конструкция получается жестче). СЭ могут быть

из металла (например медь) или из полимерного сплошного материала или в виде корделей (прутков).

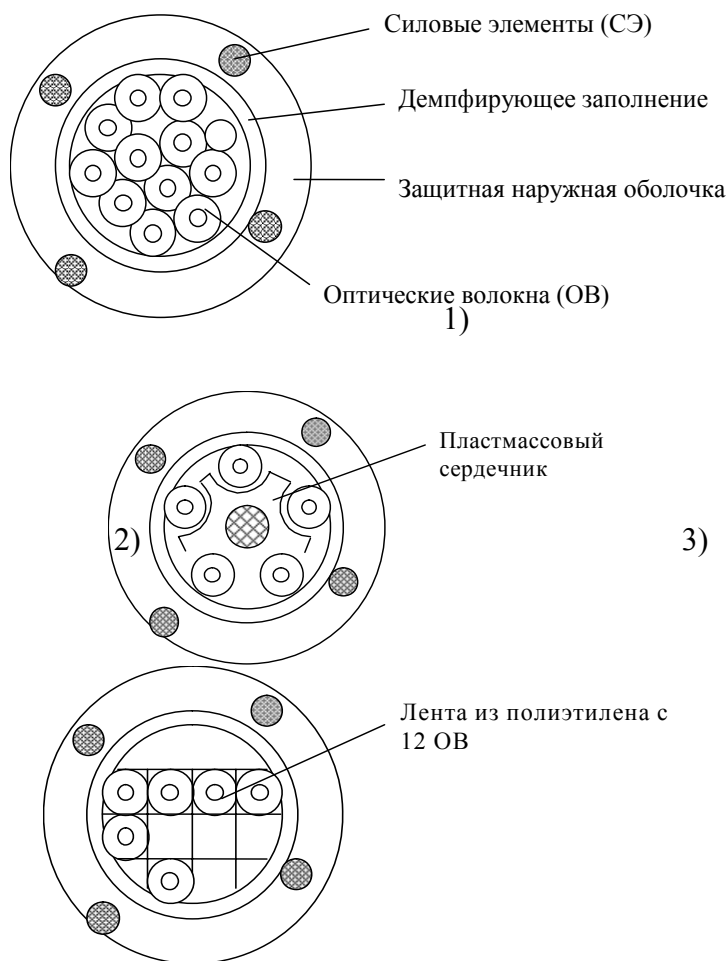


Рис. 6.20. Типовые конструкции оптических кабелей

Оптическое волокно (ОВ) может быть моноволоконном или жгутом (несколько тонких волокон в каждом ОВ). Стеклоанное двухслойное волокно используют для защиты от механических и атмосферных воздействий и усиления конструкции. Каждое волокно снаружи имеет пластмассовые покрытия (рис 6.21).

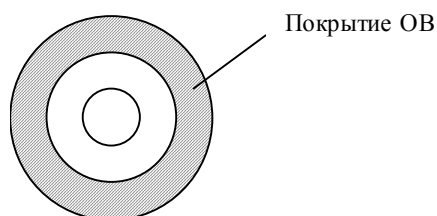


Рис. 6.21. Конструкция ОК

Сразу же после вытяжки на стеклянное волокно наносится тонкая (5 – 10 мкм) лаковая пленка из эпоксидной смолы, ацетата и т.п. Затем дается одно- или двухслойное полимерное покрытие (полиэтилен, нейлон).

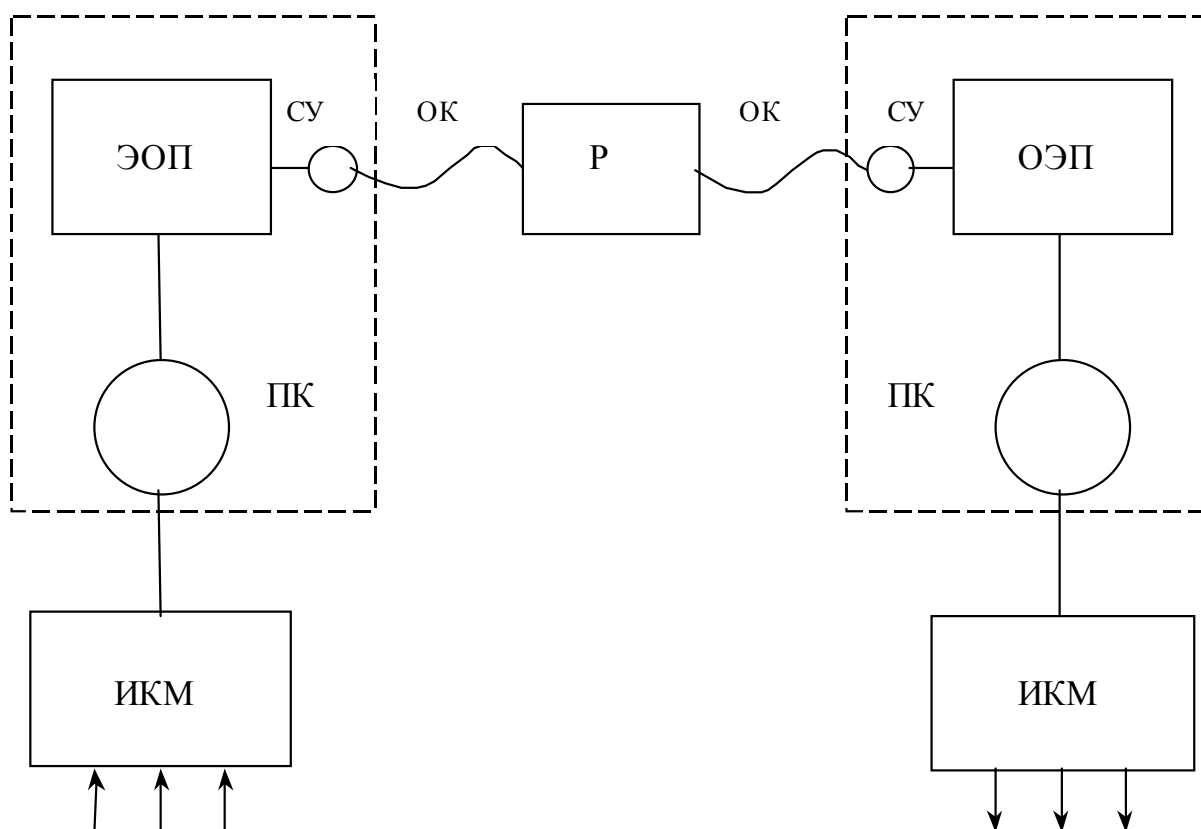
Защитная наружная оболочка чаще всего выполняется пластмассовой из по-

лиэтилена; для подземной прокладки может выполняться из алюминия с покрытием полиэтиленом от коррозии. Подводные кабели имеют стальную круглопроволочную броню и полиэтиленовую оболочку герметизации.

Демпфирующее заполнение выполняется в виде слоя из мягких пористых материалов (например пенопласт). Он амортизирует ОВ при внешних механических воздействиях и обеспечивает подвижность при изгибах оптического кабеля.

### ***Волоконно-оптические системы передачи***

Наиболее распространенной волоконно-оптической системой связи является цифровая система с временным разделением каналов и импульсно-кодовой модуляцией интенсивности излучения источника (рис. 6.22, 6.23).



ЭОП – электрически-оптическое преобразование сигнала (светодиод, полупроводниковый лазер); ОЭП – оптически-электрическое преобразование сигнала (фотодиод); СУ – согласующие устройства; ИКМ – импульсно-кодовая модуляция; ПК – преобразователь кода; Р – регенератор.

*Рис. 6.22. Схема волоконно-оптической связи*

Двухсторонняя связь осуществляется по двум волоконным световодам. По одному световоду передается сигнал в направлении А-В, по другому в направлении В-А.

Через определенные расстояния 5 – 50 км вдоль оптической линии располагают линейные регенераторы (ЛР). В них сигнал восстанавливается и усиливается до требуемого значения.

Оптические кабели соединяются с передатчиком и приемником с помощью разъемного соединителя. Для соединения ОВ могут применяться неразъемные соединения (например электрической дуговой сваркой или с помощью стеклянной трубки с отверстием под клей).

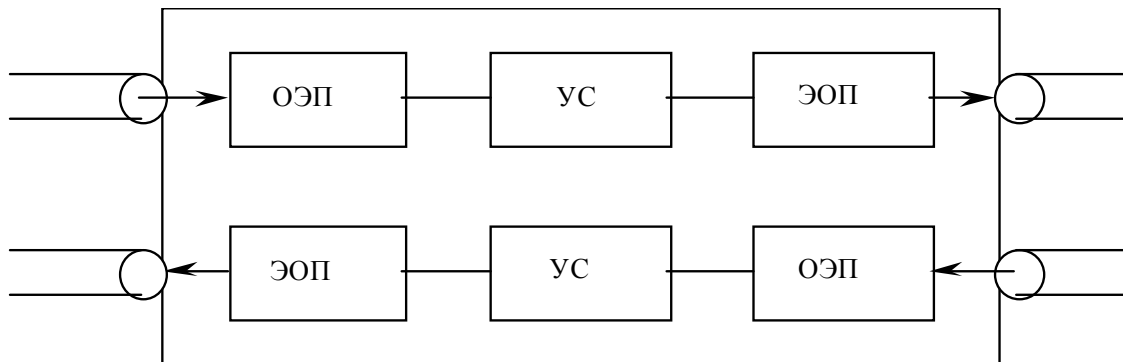


Рис. 6.23. Канал волоконно-оптической системы связи

### Контрольные вопросы

1. В чем преимущества печатного монтажа?
2. Классификация печатных плат по конструкциям и технологическим процессам изготовления.
3. Классификация печатных плат по точности и плотности печатных проводников.
4. Каковы требования к проектированию печатного монтажа?
5. Какие материалы используют для изготовления печатных плат?
6. Каковы особенности печатных плат с поверхностно-плоскостным монтажом?
7. Правила оформления чертежа печатной платы.
8. Правила установки элементов на печатной плате.
9. Основные виды проводных и кабельных линий связи. В чем их отличительные особенности?
10. Волоконно-оптические линии связи. Их достоинства и возможности применения в ЭС.
11. Каковы основные типы световодов в волоконно-оптических линиях связи?
12. Схемы волоконно-оптических систем передачи.



## 7. ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ ЭС ОТ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

### 7.1. Основные факторы и законы охлаждения

Электронные средства имеют невысокий КПД, а значит, большая часть потребляемой энергии превращается в энергию тепловых потерь.

Тепловые потери вызывают перегрев элементов конструкции относительно температуры окружающей среды. Температура нагрева элементов или прибора в целом может превысить допустимую температуру для ЭРЭ. Поэтому возникают задачи расчёта температуры элементов и конструкции в целом и проектирования локальных и общих систем охлаждения.

Всякое нагретое тело отдаёт тепло и охлаждается за счёт трех основных факторов:

- конвекции,
- излучения,
- теплопроводности (кондукции).

#### *Конвекция*

Конвективно охлаждаются нагретые тела за счет движения газа или жидкости, которые, нагреваясь, отбирают тепловую энергию.

Интенсивность теплового потока охлаждения при конвекции можно оценить по закону Ньютона

$$Q_k = \alpha_k (t - t_c) S,$$

где  $Q_k$  – интенсивность теплового потока, ккал/ч;

$\alpha_k$  – коэффициент конвекции жидкости или газа для охлаждения нагретого тела, ккал/(ч·м<sup>2</sup>·К);

$t$  – температура нагретого тела, °С;

$t_c$  – температура окружающей среды, °С;

$S$  – площадь поверхности нагретого тела, м<sup>2</sup>.

Улучшить условия конвективного охлаждения можно за счёт нескольких решений:

1. Увеличивают площадь поверхности нагретого тела (увеличение площади происходит прежде всего за счёт ребрения поверхности).

2. Увеличивают коэффициент конвекции жидкости или газа.

Так, для спокойного воздуха  $\alpha_k$  находится в пределах от 2 до 8 ккал/(час·м<sup>2</sup>·К).

Коэффициент  $\alpha_k$  (табл. 7.1) неоднозначен, так как зависит от геометрических размеров нагретого тела, его температуры и расположения плоскостей. Поэтому в инженерных расчётах этот коэффициент уточняют до конкретных значений исходя из особенностей устройства.

Таблица 7.1. Значения коэффициента конвекции жидкости или газа

| Среда               | $\alpha_k$ , ккал/(час·м <sup>2</sup> ·К) |
|---------------------|---|
| Движущийся воздух   | 20...100                                  |
| Спокойная жидкость  | 200...600                                 |
| Движущаяся жидкость | 1000...3000                               |
| Испарение жидкости  | 40000...120000                            |

Увеличивать коэффициент конвективного охлаждения можно за счет естественной вентиляции через применение перфорации, принудительной вентиляции, жидкостного охлаждения с неподвижной или с подвижной жидкостью или применяя испарение жидкости с нагретого тела.

### *Излучение*

Всякое нагретое тело излучает энергию. Интенсивность теплового потока можно оценить по закону Стефана-Больцмана

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon C_0 \left( \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right) S, \text{ ккал/ч,}$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты нагретого тела;

$C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, ккал/(час·м<sup>2</sup>·К);

$T$  – температура нагретого тела, К;

$T_c$  – температура окружающей среды, К;

$S$  – площадь поверхности нагретого тела, м<sup>2</sup>.

Улучшить условия охлаждения излучением можно за счёт следующих решений:

- увеличивая площадь поверхности нагретого тела, например, вводя ребра;

- повышая степень черноты поверхности нагретого тела за счет увеличения шероховатости поверхности и окрашивания её в темные цвета, лучше всего в черный цвет. Например, для полированной поверхности либо поверхности металла после проката  $\varepsilon = 0,02...0,08$ .

Для дерева, резины и большинства окрашенных поверхностей  $\varepsilon$  увеличивается до 0,9 – 0,95. При этом максимальное значение  $\varepsilon$  имеет для поверхности, окрашенной в черный матовый цвет.

### **Кондукция (теплопроводность)**

Нагретое тело может отдавать тепло через теплопровод за счёт теплопроводности материала. Интенсивность теплового потока кондукцией можно оценить по закону Фурье

$$Q_T = \frac{\lambda \Delta t S}{\delta},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, ккал/(час·м·°С);

$\Delta t$  – разность температур нагретого и охлажденного концов теплопровода, К;

$S$  – площадь поперечного сечения теплопровода, м<sup>2</sup>;

$\delta$  – длина теплопровода, м.

Значения  $\lambda$  для некоторых материалов приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2. Значения коэффициента теплопроводности материала

| Материал                              | $\lambda$ , ккал/(час·м·°С) |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Медь                                  | 330                         |
| Алюминий                              | 175                         |
| Сталь                                 | 50                          |
| Вода                                  | 0,5                         |
| Гетинакс, прессованная бумага, фанера | 0,1...0,2                   |
| Воздух                                | 0,02                        |

Отсюда видно, что если ЭРЭ или ЭС большой мощности тепловых потерь размещены на диэлектрическом основании (например на печатной плате), то кондуктивное охлаждение практически отсутствует. Для улучшения охлаждения таких элементов и устройств рекомендуют:

- использовать для них теплопроводы из материалов высокой теплопроводности (алюминий, медь и другие металлы);
- увеличивать площадь  $S$  теплопровода до возможных значений;
- уменьшать длину  $\delta$  теплопровода, размещая элемент с теплопроводом на несущих конструкциях  $S$ , или использовать несущие конструкции в качестве теплопровода;
- увеличить перепад температур  $\Delta t$ , охлаждая конец теплопровода.

## 7.2 Основы расчёта температуры перегрева

Уравнение теплового баланса.

Целью расчёта тепловых режимов является определение температуры нагрева на элементах и средней температуры нагрева прибора в целом при заданных параметрах конструкции и условиях эксплуатации. Задача решается через уравнение теплового баланса мощностей  $P$  тепловых потерь с мощностями охлаждения  $Q_{\text{л}}$ ,  $Q_{\text{к}}$ ,  $Q_{\text{т}}$ . Составим уравнение теплового баланса для расчёта средней температуры  $t_k$  нагрева корпуса прибора (рис. 7.1). Так, на корпусе прибора

$$P = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{т}}.$$

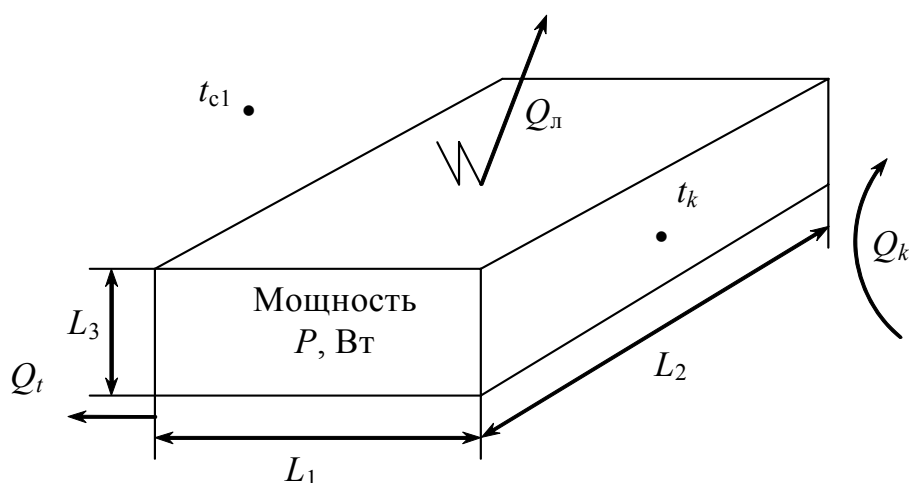


Рис. 7.1. Схема корпуса прибора для составления уравнения теплового баланса

В случае, если прибор стоит на диэлектрическом основании и окружён воздухом, теплопроводность пренебрежимо мала и  $Q_{\text{т}}$  можно пренебречь. Тогда

$$P = \frac{\varepsilon C_0}{0,86} \left( \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right) S + \alpha_k (t - t_c) S .$$

Так как  $\alpha_k$  зависит от геометрических размеров прибора и температуры его нагрева, то уточним его значение по формуле

$$\alpha_k = A \left( \frac{t - t_c}{L_i} \right)^{\frac{1}{4}} N ,$$

где  $N$  – коэффициент, учитывающий расположение плоскости корпуса и соответственно интенсивность конвекции.

Коэффициент 0,86 учитывает соотношение единиц измерения мощности:

$$1\text{Вт} = 0,86 \text{ ккал/ч.}$$

Для боковых поверхностей  $N_6 = 1$ , нижней плоскости  $N_n = 0,7$ , верхней плоскости  $N_v = 1,3$ .

$L_i$  – определяющий размер охлаждаемой плоскости. Для боковых плоскостей  $L_i = L_3$  (высота), для верхней и нижней  $L_i$  – узкая сторона.

$A$  – коэффициент конвективного охлаждения, зависящий от температуры и геометрических размеров корпуса прибора, выбирается из таблиц.

Таким образом

$$P = \frac{\varepsilon C_0}{0,86} \left( \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right) S + A \left( \frac{S_6}{L_3^{1/4}} + \frac{0,7S_n + 1,3S_v}{L_i^{1/4}} \right) (t - t_c)^{\frac{5}{4}}.$$

В записанном уравнении теплового баланса коэффициент  $A$  зависит от искомой температуры  $t$ . Поэтому такие уравнения решаются методом последовательных приближений через построение тепловой характеристики прибора.

Для построения тепловой характеристики задаются предполагаемой температурой перегрева прибора  $\Delta t_1 = t_{k1} - t_c$ , выбирают из таблиц коэффициент  $A$ , подставляют в уравнение теплового баланса принятые значения и рассчитывают мощность  $P_1$  (рис. 7.2).

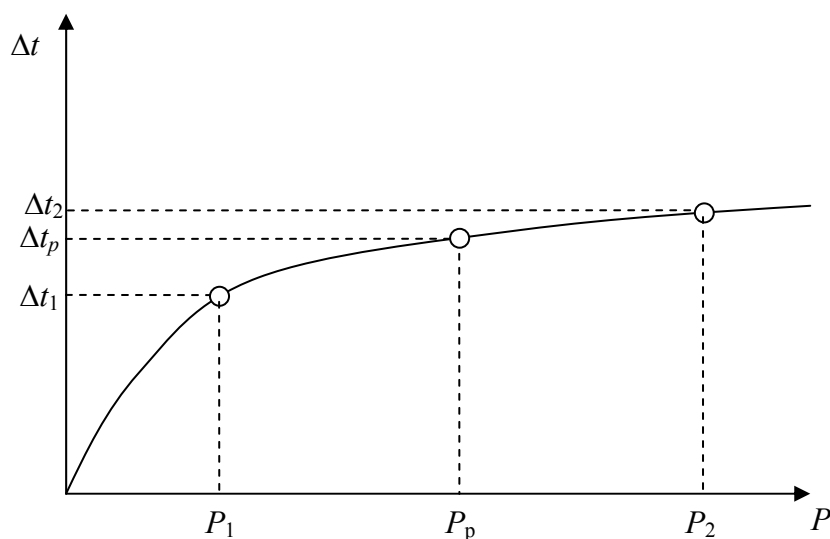


Рис. 7.2. Построение тепловой характеристики прибора

Так как тепловая характеристика нелинейная, то необходимо найти ещё одну точку характеристики, задавшись новым значением перегрева  $\Delta t_2$  и рассчитав новые значения мощности  $P_2$ .

По тепловой характеристике для реального заданного значения мощности рассчитываются реальные температуры перегрева прибора.

### 7.3. Методы интенсификации охлаждения. Элементы локального охлаждения

Для интенсификации локального охлаждения элементов конструкции улучшают условия охлаждения за счёт теплопроводности, конвекции и излучения.

Под мощные транзисторы или микросхемы предлагают теплопровод (рис. 7.3). Теплопроводы выполняют из металла высокой теплопроводности, например алюминий, но лучше из меди, однако следует учитывать, что медь дороже и тяжелее алюминия.

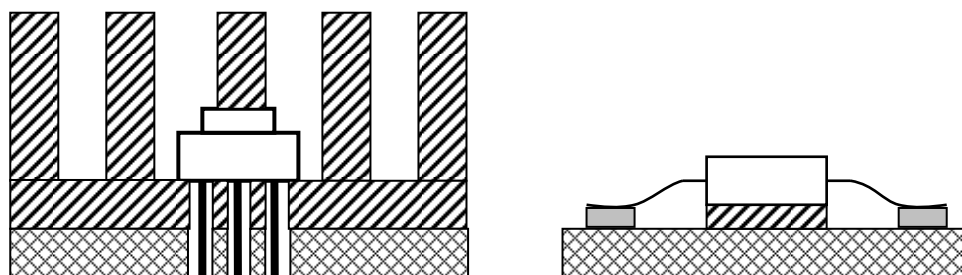


Рис. 7.3. Использование радиаторов и теплоотводящих шин

Чтобы улучшить условия охлаждения теплопроводом, увеличивают площадь его сечения  $S$ , а также площади поверхности его охлаждения  $S$ .

Увеличить площадь теплопровода у транзистора можно его ребрением (ребристый радиатор). Дополнительно увеличить площадь радиатора можно, предлагая вместо рёбер игольчатую форму (игольчатый радиатор).

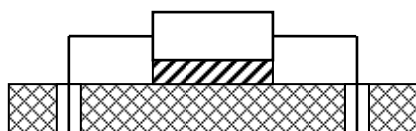


Рис. 7.4. Использование теплоотводящей шины

Под микросхемы с планарными выводами (тип корпуса 4) и под микросхемы со штырьковыми выводами (тип корпуса 2) предлагают шины теплоотводящие, показанные на рис. 7.3 и 7.4.

Толщина шин может быть 0,5...0,7 мм, что определяется максимально допустимым зазором между микросхемой и платой. Под шину на печатную плату должна устанавливаться диэлектрическая прокладка из стеклоткани прокладочной СП1

толщиной 0,1 мм. Прокладка на плату приклеивается клеем ВК-9. Микросхемы также приклеиваются к теплоотводящей шине, что улучшает теплопроводность и повышает прочность конструкции. Эквивалентная схема теплоотвода от корпуса ИС в этом случае имеет вид (рис. 7.5):

где  $R_k$  – тепловое сопротивление клея, рассчиты-

ваемое по формуле:  $R_k = \frac{\delta_k}{\lambda_k S_k}$ ,

где  $\delta_k$ ,  $\lambda_k$ ,  $S_k$  – параметры слоя клеевого соединения как участка теплопровода.

$R_T$  – тепловое сопротивление теплоотводящей шины, рассчитываемое по формуле:

$$R_T = \frac{\delta_T}{\lambda_T S_T},$$

где  $\delta_T$ ,  $\lambda_T$ ,  $S_T$  – параметры теплоотводящей шины.

Так как теплопроводность клея  $\lambda_k$  очень низкая, то тепловое сопротивление клеевого соединения микросхемы получается соизмеримым с тепловым соединением шины. Отсюда следует:

1. Необходимо исполнить клеевые соединения малой толщиной клея  $\delta_k$  (не более 0,1 мм).

2. Увеличивают теплопроводность клея, применяя пасты с повышенной теплопроводностью либо добавляя компоненты высокой теплопроводности.

3. Тепловое сопротивление теплопровода нет смысла приближать к нулю, увеличивая сечение  $S$ , поэтому толщину теплопроводящих шин ограничивают значением 0,5 – 0,6 мм. Для микросборок или корпусированных ИС в корпусе толщина теплопровода может быть увеличена до 1,8 мм.

Теплопроводящее основание представляет собой конструкцию теплопровода по всей плоскости печатной платы, в котором выполняются окна под выводы микросхем.

Улучшить условия охлаждения теплопроводом можно, уменьшая длину теплопровода от транзистора или микросхемы на корпус прибора, для этого предлагают транзистор с радиатором установить не на печатную плату, а на несущие металлические конструкции прибора. Лучше когда радиатор с транзисторами используется в качестве несущей конструкции устройства.

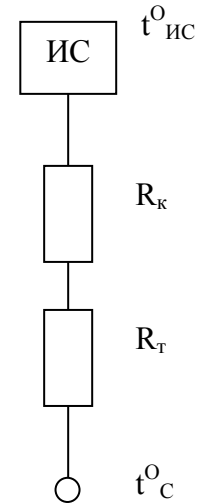


Рис. 7.5. Эквивалентная схема теплоотвода

Значительно увеличить теплопроводность можно с помощью тепловых труб – стержней, тепловое сопротивление которых близко к нулю.

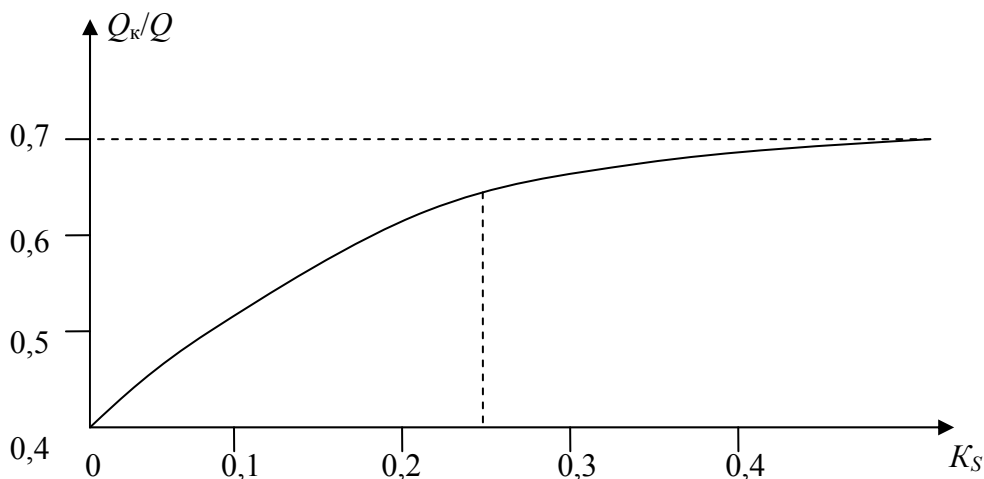
#### 7.4. Общие системы охлаждения

Общие системы охлаждения предназначены для охлаждения приборов и устройств в целом. Приборы и устройства ЭС могут исполняться даже в герметичном корпусе и охлаждаться естественным путём, если удельная поверхность охлаждения  $S_{уд} = S/P$  более  $90 \text{ см}^2/\text{Вт}$ . В этом случае удельная мощность тепловых потерь  $P_{уд} = P/V$  не более  $10...15 \text{ Вт}/\text{дм}^3$ .

Если указанные условия не выполняются и **удельная поверхность меньше чем  $90 \text{ см}^2/\text{Вт}$** , то необходимо предлагать общую систему охлаждения. Самым простым способом интенсификации охлаждения является естественная вентиляция. Естественную вентиляцию внутри прибора можно обеспечить, если предложить перфорацию корпуса. Для улучшения конвективного охлаждения электрорадиоэлементов рекомендуется вертикальная компоновка плат параллельно либо перпендикулярно передней панели прибора. Количество перфораций определяется оптимальным коэффициентом перфораций (рис. 7.6)

$$K_S = S_0/S,$$

где  $S_0$  – суммарная площадь перфораций поверхности;  $S$  – площадь поверхности.



$Q_k$  – интенсивность теплового потока охлаждения конвекцией,  
 $Q$  – общая мощность тепловых потерь.

Рис. 7.6. Зависимость эффективности охлаждения от коэффициента перфораций



Из графика видно, что для герметичного корпуса ( $K_S = 0$ ) интенсивность конвекции охлаждения составляет 40 % от общих тепловых потерь. Предлагая перфорацию корпуса с коэффициентом  $K_S = 0,25 - 0,30$  увеличивают интенсивность охлаждения конвекцией на 20 – 25 %.

Можно заметить, что коэффициент перфорации заметно влияет на улучшение условий охлаждения при значениях  $K_S = 0,25 \dots 0,30$ . При этом условия охлаждения в нагретой зоне улучшаются на 25 % относительно герметичного корпуса.

Перфорацию рекомендуется выполнять как в верхней и нижней плоскостях корпуса, так и в боковых плоскостях. Перфорацию чаще всего выполняют в виде отверстий диаметром 6 мм или прямоугольных прорезей, щелей. При исполнении прорезей в корпусе необходимо, чтобы прорезь не была излучающей для электромагнитных волн ЭС. Для этого прорезь должна размещаться перпендикулярно вектору напряжённости магнитного поля помех проектируемого ЭС.

В случаях проектирования брызго- и водозащищенных ЭС, а также защита от посторонних предметов в качестве перфорации на боковых стенках предлагают жалюзи (прорези, закрытые козырьком). Размеры жалюзи произвольны и зависят от толщины стенки и возможности операций штамповки.

Если *удельная поверхность охлаждения  $50 \text{ см}^2/\text{Вт}$  и ниже*, то предлагают принудительную вентиляцию. Для принудительной вентиляции внутрь прибора устанавливают вентилятор или прибор, через патрубки подключают к центральной вентиляционной установке.

Принудительная вентиляция по принципу действия может быть приточной либо вытяжной.

В случае *приточной вентиляции* вентилятор работает на приток холодного очищенного воздуха в нагретую зону устройства, тогда вентилятор устанавливают в нижней части прибора у вентиляционного окна, а нагретый воздух выходит в верхней части прибора через перфорацию или вентиляционное окно с козырьком.

В случае *вытяжной вентиляции* вентилятор работает на вытяжку горячего воздуха из нагретой зоны, тогда его размещают в верхней части прибора, а забор воздуха обеспечивается снизу прибора через перфорацию или вентиляционное окно. Вытяжная вентиляция обеспечивает большую скорость воздушного потока охлаждения непосредственно в локальной зоне перегрева. Однако в этом случае вентилятор работает в тяжелых условиях высоких температур.

Система вентиляции может быть централизованной, когда внутрь прибора подают очищенный и холодный воздух от отдельной

вентиляционной установки или заборным воздухом объекта установки ЭС от патрубков внешнего воздухозабора. Теплопроводящее основание ячеек может заканчиваться воздуховодом, через который прогоняется воздух принудительной вентиляцией.

Если *удельные поверхности охлаждения  $30 \text{ см}^2/\text{Вт}$  и менее*, то приходится применять жидкостные системы охлаждения или даже испарительные.

В жидкостных системах охлаждения вместо воздуха или газа используют жидкость с температурой испарения большей, чем температура нагрева ЭС. Для улучшения жидкостного охлаждения создают принудительное движение жидкости с помощью насоса охлаждения. Жидкость или воздух могут принудительно охлаждать теплопроводы мощных элементов конструкции (радиаторы охлаждения или теплоотводящие основания ячеек). Жидкость прогоняется через каналы радиатора охлаждения или теплоотводящего основания.

В испарительных системах создают условия испарения жидкости с поверхности нагретой зоны, для чего применяют жидкости, температура нагрева которых равна температуре испарения.

Для конденсации испарённой жидкости используют элементы локального охлаждения, например радиаторы охлаждения.

Испарительная система в простейшем случае реализуется в виде теплоотводящей трубы для охлаждения мощных транзисторов или микросхем. Теплоотводящие трубы представляют собой герметичные сосуды, с различными размерами и формой, тепловое сопротивление которых близко к нулю. Для того чтобы сконденсированная жидкость из зоны охлаждения возвращалась в зону нагрева, внутренние стенки трубы покрыты пористым материалом, например стекловолокном или пористые пластмассы с включенными металлическими шариками.

Теплоотводящая труба выполняется из меди круглого или прямоугольного сечения, один конец её может устанавливаться под микросхему или транзистор. Тепловая труба внутри полая, частично заполнена жидкостью, температура испарения которой меньше предельно допустимой для микросхемы или транзистора. Для конденсации паров жидкости другой конец трубы должен охлаждаться, например радиатором охлаждения. Радиатор охлаждения может быть вынесен из зоны плотной компоновки ЭРЭ. Роль радиатора может исполнять несущая стенка конструкции.

Для устройств большой мощности тепловых потерь, а также работающих в тяжелых условиях высоких температур, запыленности, загрязненности атмосферы применяют систему охлаждения, исполь-

зую совместно принципы испарения жидкости, движения жидкости и вентиляции, например холодильные установки.

Такие системы работают автономно. Недостатком этих систем считаются их большие габаритные размеры и значительное энергопотребление.

Уменьшить температуру в нагретой зоне можно, отбирая тепло с помощью полупроводниковых термоэлементов, использующих эффект Пельтье. В зависимости от интенсивности теплового потока полупроводниковые термоэлементы соединяют в батареи. “Холодные” пластины термобатареи могут использоваться для охлаждения мощных ИС или транзисторов или для организации герметичной зоны охлаждения, или термостатирования устройства, например микротермостаты для кварцевых генераторов.

“Горячие” пластины термобатареи охлаждают естественной вентиляцией, возможно с применением радиатора.

### **7.5. Основы автоматизации выбора способа охлаждения электронных средств**

Для того чтобы обеспечить необходимый тепловой режим ЭС, необходимо выбрать способ охлаждения, который учитывает особенности конструкции ЭС, условия эксплуатации и тепловые потери элементов схемы и устройства в целом.

**Цель проектирования** – выбор такой системы охлаждения, которая обеспечивает допустимый тепловой режим работы элементов и имеет наилучшие показатели качества.

Задача выбора способа тепловой защиты ЭС относится к классу так называемых трудноформализуемых задач, поэтому для её решения целесообразно применить методы и технологии экспертных систем [1п]. В подобных задачах оперируют в основном с символьной, а не числовой информацией, т. е. используют лингвистические переменные. Кроме того, алгоритмический подход в таких задачах малоприменим.

Важно заметить, что применение методов искусственного интеллекта (экспертных систем в частности) ускоряет работу специалиста, оберегает его от грубых ошибок, но предлагаемые системой проектные решения носят приближенный, ориентировочный характер, и окончательный выбор сделает конструктор после выполнения инженерных расчетов.

Структурный анализ подсистемы тепловой защиты ЭС выявил три дополняющих друг друга средства охлаждения:

- отвод тепла от кожуха ЭС;

- общее охлаждение;
- локальное охлаждение.

Структуру конструкций ЭС, в том числе и структуру системы тепловой защиты, удобно представлять в виде И–ИЛИ–дерева, которое является частным случаем семантической сети [2]. Указанные выше три средства охлаждения образуют первый ярус этого дерева, состоящий из И–вершин.

В свою очередь, каждая из этих вершин порождает дочерние ИЛИ–вершины.

Например, вершина “локальное охлаждение” порождает следующие И–вершины:

- отсутствует;
- радиатор;
- вентилятор (кулер);
- вентилятор + радиатор;
- теплоотводящая шина;
- теплоотводящее основание;
- тепловая труба;
- термостат.

Пусть в результате анализа задачи была выбрана наиболее простая и широко распространенная продукционная модель знаний. Ядро правила продукции представляет собой естественное для человека высказывание:

ЕСЛИ <условие>, ТО <заключение>.

Если база знаний экспертной системы содержит более тысячи правил, то система в процессе консультации может выдавать пользователю нетривиальные рекомендации.

Правила продукции легко записать, если предварительно сформировать граф решений задачи. Граф решений в общем случае может быть сложным и генерируется в процессе вывода.

Если же задачи не слишком сложные, как в нашем случае, граф решений можно сформировать заранее, до того, как записаны правила продукции в базу знаний.

Представим задачу “Тепловая защита ЭС” в виде трех подзадач и определим их последовательность в соответствии с процессом проектирования так, чтобы последующие подзадачи могли использовать результаты решения предыдущих.

1. “Кожух” (отвод тепла от кожуха ЭС).
2. “Общее охлаждение”.
3. “Локальное охлаждение”.

Общее решение задачи представляет собой комбинацию из решений этих трех подзадач.

Граф решений для подзадачи “Кожух” представлен на рис. 7.7.

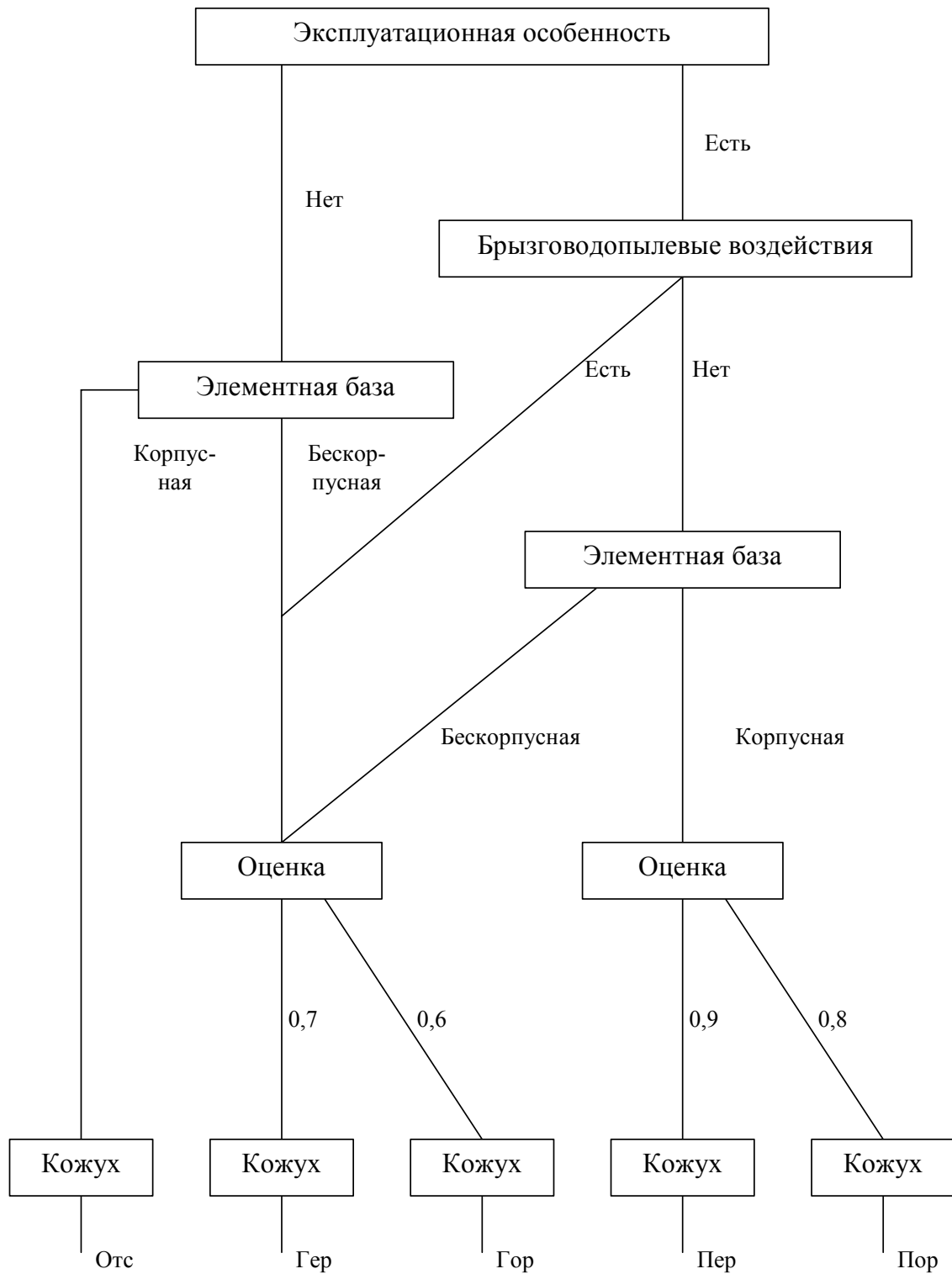


Рис. 7.7. Граф решений базы знаний «Кожух ЭС»

Терминальные вершины графа обозначены атрибутом “Кожух”, который принимает следующие значения:

$O_{тс}$  – отсутствует;

$\Gamma_{ер}$  – герметичный;

$\Gamma_{ор}$  – герметичный оребренный;

$\Pi_{ер}$  – перфорированный;

$\Pi_{ор}$  – перфорированный оребренный.

Другие вершины графа (в виде прямоугольников) представляют атрибуты выбора проектного решения (исходные данные для данной задачи).

Каждое из правил представляет собой путь из корневой вершины графа в одну из терминальных.

Например:

ЕСЛИ Эксплуатационная особенность = есть &

Брызговодапылевые воздействия = нет &

Элементная база = бескорпусная

ТО Кожух =  $\Gamma_{ер}$  (0,7)

Кожух =  $\Gamma_{ор}$  (0,6).

Число в круглых скобках означает оценку выбранного проектного решения или степень предпочтения значения атрибута (или фактор уверенности по другой терминологии), т. е. здесь используется наиболее простая скалярная форма представления нечетких знаний [2]. Нечеткие знания в данной задаче моделируют ситуацию, когда экспертная система предлагает конструктору несколько альтернативных проектных решений. Окончательный выбор конструктор осуществляет после выполнения инженерных расчетов.

Граф решений для задачи «Общее охлаждение ЭС» представлен на рис. 7.8. Периферийные вершины графа обозначены атрибутом Об.охл, который принимает следующие значения:

Ест – естественное;

Пр – принудительное;

ТОМЭК – термоотвод от мощных ЭРЭ на кожух;

ЕЖ – естественное жидкостное;

ПЖ – принудительное жидкостное;

ЕИ – естественное испарительное;

ПИ – принудительное испарительное.

Как видно из рисунка, в данной задаче используются решения, выбранные раньше, а именно в качестве атрибута выбора используется атрибут «Кожух» из предыдущей задачи.

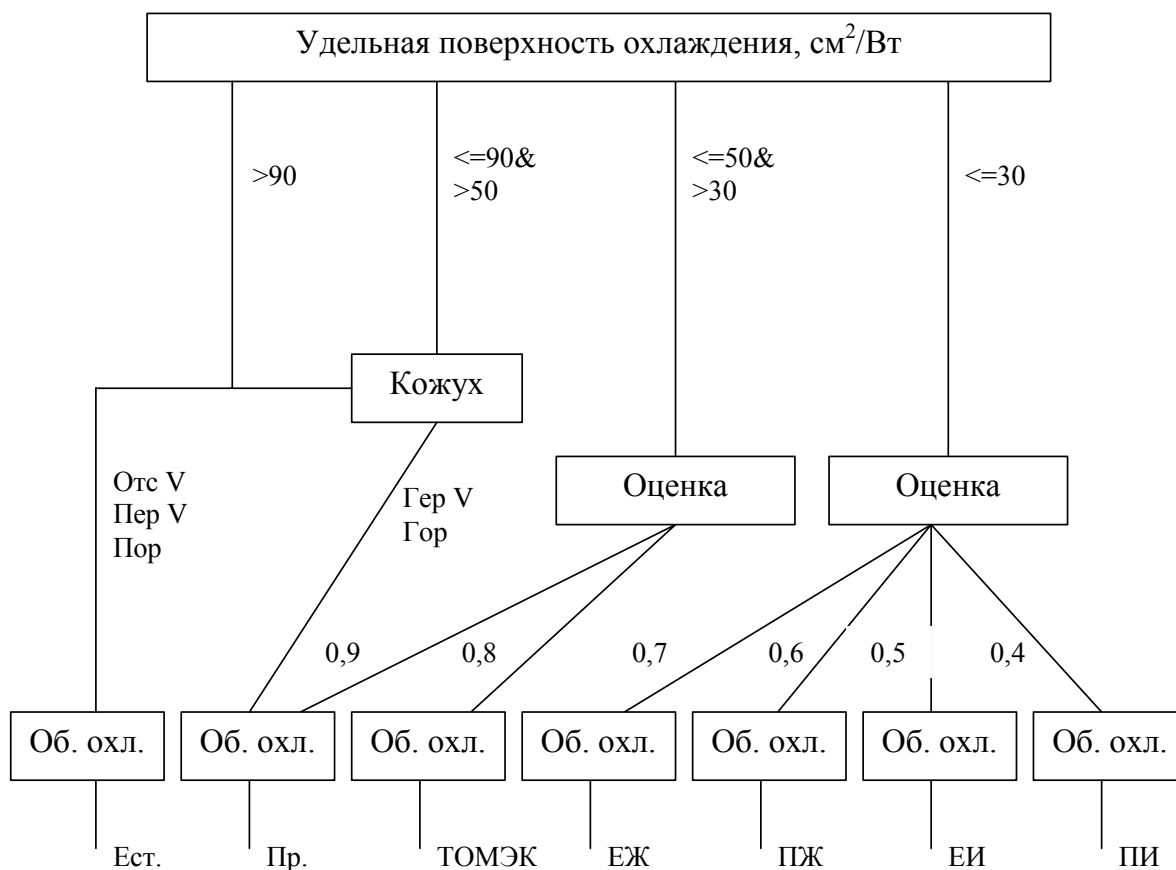


Рис. 7.8. Граф решений базы знаний «Общее охлаждение ЭС»

Граф решений для задачи “Локальное охлаждение” представлен на рис. 7.9.

Терминальные вершины графа обозначены атрибутом Лок.охл., который принимает следующие значения:

- Отсут – отсутствует;
- Рад – радиатор;
- Кулер – кулер;
- К+Р – кулер + радиатор;
- Шина – теплоотводящая шина;
- ТОО – теплоотводящее основание;
- ТТр – тепловая труба;
- ТСт – термостат.

Кружок на входе в терминальную вершину означает, что данное проектное решение или не рекомендуется, или невозможно (оценка = 0.00). Так, из графа на рис. 7.9. следует, что нельзя применять теплоотводящую шину для ИС с расположением выводов по периметру.

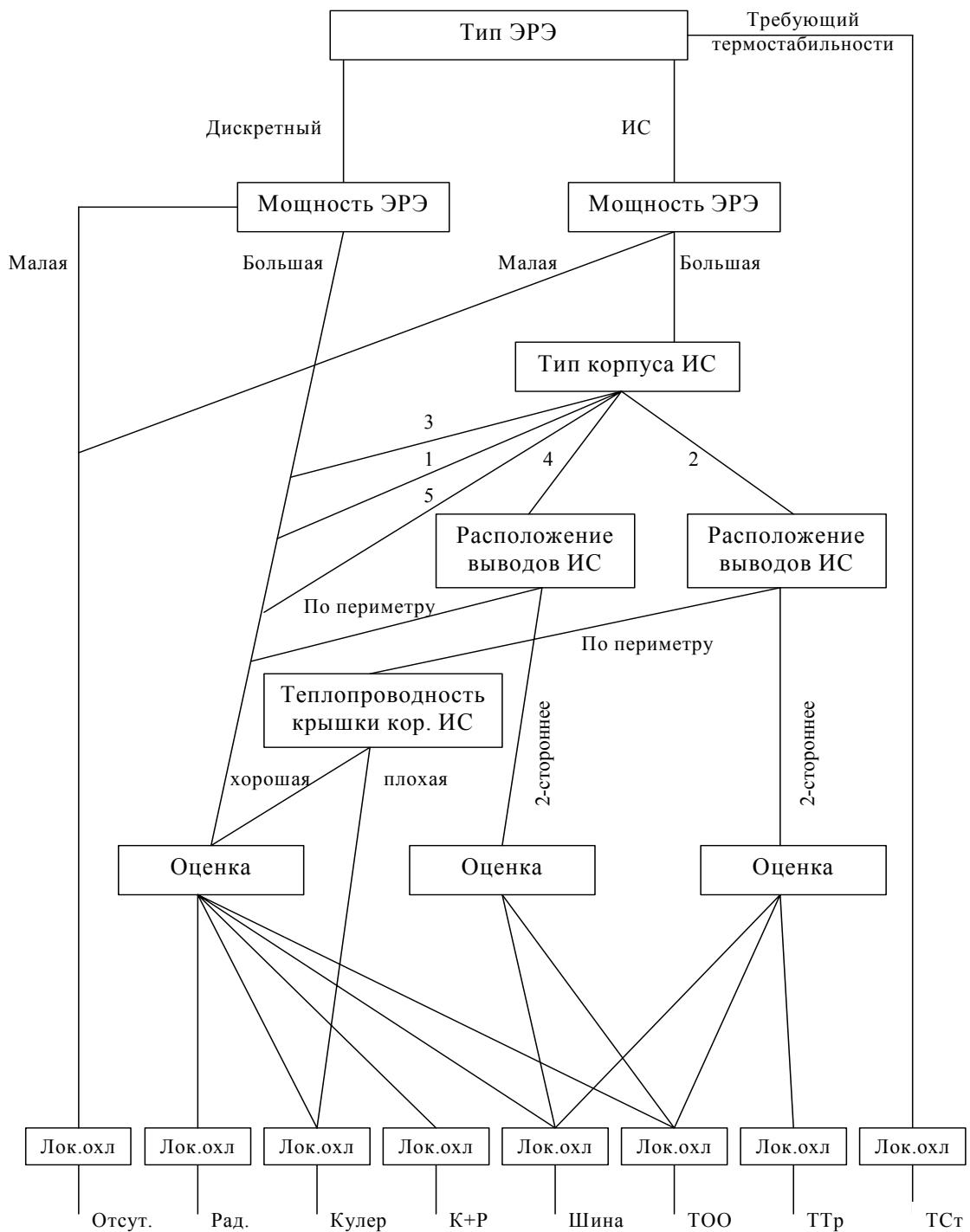


Рис. 7.9. Граф решений базы знаний «Локальное охлаждение»

### Контрольные вопросы

1. Назовите три закона охлаждения нагретых тел и основные направления улучшения охлаждения.



2. Составьте уравнение теплового баланса для расчета средней температуры перегрева прибора.
3. Методика решения уравнения теплового баланса. Построение и назначение тепловой характеристики ЭС.
4. Какие методы и элементы применяются для локального охлаждения мощных электрорадиоэлементов и микросхем?
5. Общие системы охлаждения систем и приборов ЭС, каковы принципы их построения?
6. Системы естественного и принудительного охлаждения, их сравнительный анализ по эффективности охлаждения и материальным затратам.
7. Жидкостные и испарительные системы охлаждения, варианты их исполнения и рекомендации по улучшению условий охлаждения.
8. Тепловые трубы, устройства термостатирования, их конструкции и область применения.
9. В чем состоит сложность задачи автоматизации выбора способа охлаждения ЭС? Какими методами она решается?
10. Каковы атрибуты выбора решений базы знаний «Кожух ЭС»?
11. Каковы атрибуты выбора решений базы знаний «Общее охлаждение ЭС»?
12. Каковы атрибуты выбора решений базы знаний «Локальное охлаждение ЭС»?

## **8. ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ ЭС ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

### **8.1. Удары и вибрации в ЭС. Конструктивные методы обеспечения вибро-, ударопрочности и устойчивости**

Аппаратура подвижных объектов испытывает удары и вибрации. Вибрации характеризуются и задаются частотой и амплитудой. Автомобильная аппаратура подвергается воздействию вибраций на частотах  $f$  от 10 до 70 Гц, самолётная – на частотах от 3 до 2000 Гц. Более удобной для оценки влияния вибрации является величина ускорения либо перегрузка  $I$ , измеряемая в единицах  $g$ . При вибрациях перегрузку можно рассчитать через перемещение по формуле

$$I = \omega^2 A / 9800,$$

где  $I$  – перегрузка в единицах ускорения свободного падения;

$\omega = 2\pi f$  – круговая частота, рад/с;

$A$  – амплитуда виброперемещения, м.

Вибрации, удары опасны для элементов конструкции тем, что возникают перегрузки на элементы конструкции. При этом силы, действующие на элементы, рассчитываются по формуле:

$$F = M \cdot I,$$

где  $M$  – масса элементов.

В зависимости от условий эксплуатации и особенностей конструкции защите от механических воздействий могут подвергаться как радиоэлектронные комплексы, так и отдельные их блоки, ячейки и элементы.

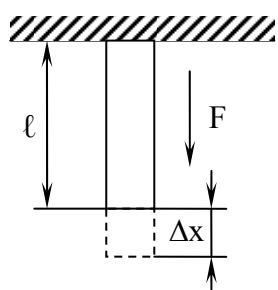


Рис. 8.1. Деформация растяжения-сжатия стержня

Для того чтобы проектируемая аппаратура была вибро- и ударопрочной, необходимы следующие предпосылки:

1. При проектировании необходимо обеспечить минимальную массу элементов конструкции.

2. Некоторые элементы конструкции могут испытывать деформацию растяжения-сжатия, величина которой может оказаться недопустимо большой (рис. 8.1). Например, стержень испытывает деформацию

$$\Delta X = F \cdot l / E \cdot S,$$

где  $E$  – модуль упругости, Па;

$S$  – площадь поперечного сечения стержня, м<sup>2</sup>;

$l$  – длина стержня, м.

Для вибро- и ударопрочности таких элементов рекомендуется уменьшать длину элемента, увеличивать прочность  $[\sigma]$  и жесткость  $E$  материала. Предпочтительно выбирать такие материалы, у которых

большая жесткость  $E$  при малой удельной массе.

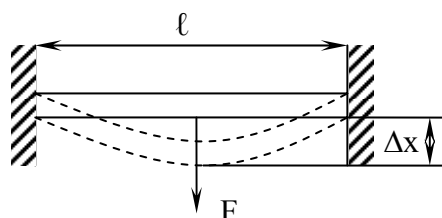


Рис. 8.2. Деформация изгиба

3. Некоторые элементы конструкции испытывают деформации изгиба (рис. 8.2). Так, балка постоянного сечения, выполненная из однородного изотропного материала, при приложении силы  $F$ , будет деформироваться на

величину

$$\Delta X = F \cdot l^3 / b \cdot E \cdot I,$$

где  $b$  – коэффициент, зависящий от точки приложения силы;

$I$  – момент инерции сечения,  $\text{м}^4$ .

Для жесткости и прочности подобных элементов рекомендуется уменьшать расстояние между точками крепления элементов или предлагать дополнительные точки крепления. Например, крепление платы не только по периметру, но и в центре. Для подобных элементов увеличивают момент инерции сечения.

Для квадратов  $I = a^4/12$  ( $a$  – сторона квадрата). Для прямоугольников  $I = a \cdot h^3/12$  ( $a$  – сторона основания,  $h$  – высота).

Можно видеть, что для жесткости подобных элементов следует увеличивать прежде всего толщину  $h$ .

Толщина платы до берется из стандартного значения толщины фольгированного стеклотекстолита: 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3.

Рекомендуется при одной и той же площади сечения увеличивать момент инерции сечения не за счёт размера  $h$ , а посредством отбортовки, выдавки на плоскости листовых несущих элементов.

Момент инерции  $I$  в сечении сложной конфигурации можно найти через моменты инерции элементарных сечений  $I_i$  (рис. 8.3).

$$I = \sum_{i=1}^n I_i + \sum l_i^2 \cdot S_i,$$

где  $l_i$  – смещение центров тяжести сложной фигуры относительно центров тяжести каждой элементарной;

$S_i$  – площадь каждой фигуры.

Тонколистовые несущие конструкции выполняют жесткими за счёт уголкового профиля сечения.

Вибрации особенно опасны тогда, когда частота вибраций совпадает с собственной частотой механических колебаний элемента. Собственная частота любого элемента конструкции зависит от жёсткости и массы конструкции.

При проектировании ЭС прежде всего следует выяснить, нужны ли вообще защитные мероприятия. С этой целью сравнивают оговоренные в технических условиях величины допустимых механических воздействий для предназначенных к использованию элементов (микросхем, транзисторов, резисторов и т. д.) с величинами механических

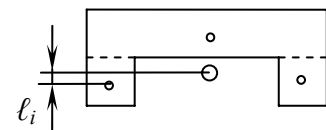


Рис. 8.3. Момент инерции сечения

воздействий на объекте установки ЭС. При этом величины воздействующих механических факторов следует скорректировать с учетом возможного резонансного усиления колебаний по пути их распространения от места установки блока до конкретного рассматриваемого элемента. В случае, если уровни воздействующих механических факторов превышают допустимые, предусматривают защитные мероприятия с оценкой их эффективности.

Защитные системы от наиболее распространенных видов *МВ*, к которым относят вибрации и удары, могут быть пассивными и активными. Пассивные виброзащитные системы по сравнению с активными системами более просты в исполнении и не требуют для выполнения своих функций затрат дополнительной энергии.

Пассивные способы виброзащиты в диапазоне частот можно условно подразделить на четыре основные разновидности (рис. 8.4). Такая классификация способов виброзащиты позволяет более четко уяснить физическую сущность каждой разновидности и оценить их эффективность с помощью амплитудно-частотной характеристики.

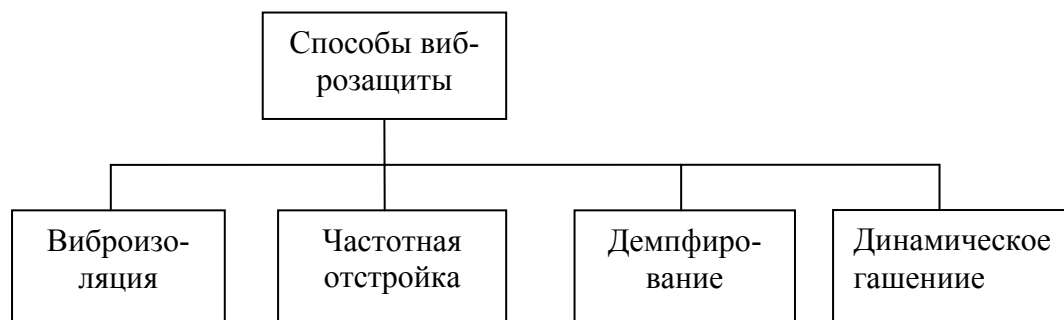


Рис. 8.4. Основные способы виброзащиты ЭС

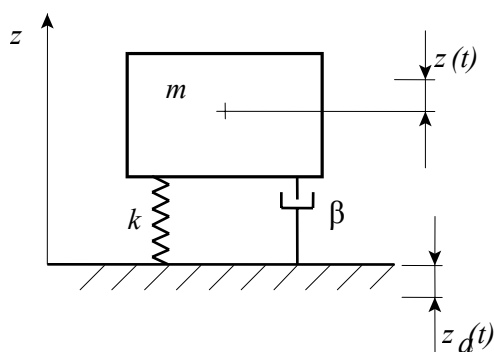


Рис. 8.5. Система с одной степенью свободы при кинематическом возбуждении

Рассмотрим механическую упругоинерционную систему с одной степенью свободы (рис. 8.5). При кинематическом возбуждении (за счет колебаний основания) по гармоническому закону

$$z_a = S_0 e^{j\omega t}, \quad (8.1)$$

где  $S_0$  – амплитуда виброперемещения основания;

$j$  – мнимая единица.

Уравнение движения системы с вязким трением имеет вид

$$m\ddot{z} + \beta(\dot{z} - \dot{z}_a) + k(z - z_a) = 0. \quad (8.2)$$

Здесь  $z - z_a = z_1$  – упругая деформация связей.

Подставляя в это уравнение частное решение в виде

$$z = z(t) = S_B e^{j(\omega t + \alpha)}, \quad (8.3)$$

где  $S_B$  – амплитуда вибрации;

$\alpha$  – сдвиг фаз между перемещением основания и инерционного элемента;

и выражение для виброперемещения основания  $z_a$  из (8.1), после преобразований получаем

$$(-m\omega^2 + j\omega\beta + k)z = (j\omega\beta + k)z_a,$$

откуда найдем передаточную функцию

$$\Phi(j\omega) = z/z_a = (k + j\omega\beta)/(k - m\omega^2 + j\omega\beta).$$

Амплитуда колебаний системы

$$S_B = |z| = |z_a| \frac{\sqrt{k^2 + \omega^2\beta^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + \omega^2\beta^2}} = S_0 \frac{\sqrt{1 + \eta^2 v^2}}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + \eta^2 v^2}},$$

где  $v = \omega/\omega_0$  – относительная частота;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  – собственная частота колебаний системы;

$\eta = (\beta \cdot \omega_0)/k$  – коэффициент механических потерь.

Величина

$$\mu = S_B/S_0 = \sqrt{1 + \eta^2 v^2} / \sqrt{(1 - v^2)^2 + \eta^2 v^2} \quad (8.4)$$

получила название *коэффициента передачи*. Коэффициент передачи колебаний защищаемого объекта в диапазоне частот воздействующих вибраций часто используется в качестве критерия оценки эффективности виброзащиты.

Он выражает соотношение между амплитудами  $S_B$  системы и  $S_0$  основания при кинематическом возбуждении колебаний.

Для системы с демпфированием, пропорциональным перемещению, уравнение движения будет иметь вид

$$m\ddot{z} + (1 + j\eta)(z - z_a)k = 0. \quad (8.5)$$

Подставляя в это уравнение выражения (8.1) и (8.3), получаем:

$$S_B = |z|/|z_a| = \sqrt{1 + \eta^2} / \sqrt{(1 - \nu^2)^2 + \eta^2}.$$

Следовательно, коэффициент передачи

$$\mu = \sqrt{1 + \eta^2} / \sqrt{(1 - \nu^2)^2 + \eta^2}. \quad (8.6)$$

График зависимости  $\mu$  от коэффициента  $\nu$  приведен на рис. 8.6.

Эти графики позволяют объяснить основные способы виброзащиты ЭС – виброизоляцию, частотную отстройку, вибродемпфирование. Как видим, на рис. 8.6, можно выделить три области. Первая, когда  $\nu < 0,4$  и  $\mu \approx 1$ , называется областью *дорезонансных колебаний*. Так как  $\nu = f / f_0$ , для этой области справедливо неравенство  $f_0 > 2,5f$ . То есть для исключения возможности резонансных колебаний необходимо,

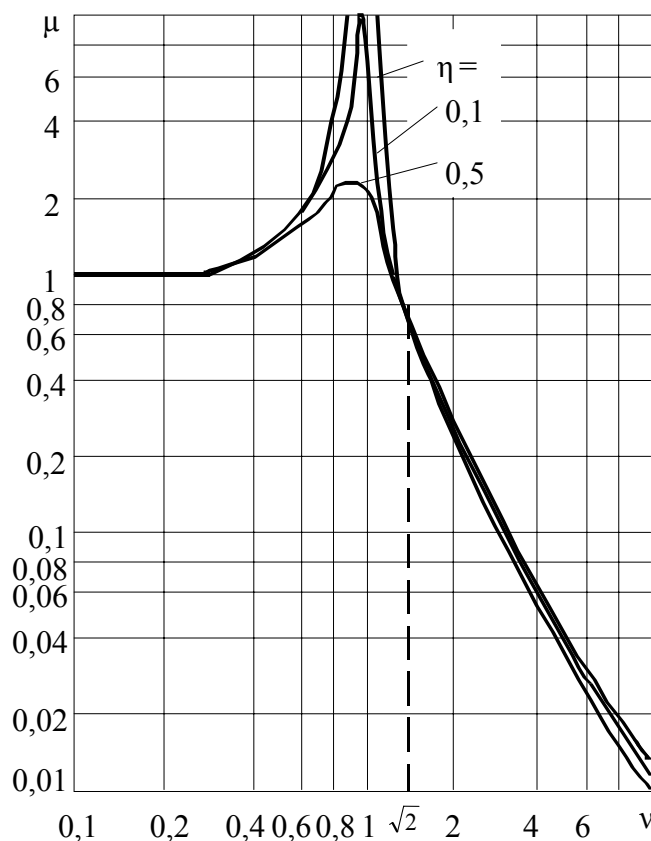


Рис. 8.6. Зависимость коэффициента передачи от коэффициента настройки для деформации связи

чтобы собственная частота колебаний  $f_0$  в 2,5 раза превышала частоту возбуждения. На практике чаще используют соотношение

$$f_0 > 2f. \quad (8.7)$$

Это объясняется тем, что в государственных стандартах указано: резонанс отсутствует, если  $\mu \leq 2$ . Это условие обычно выполняется при соотношении  $\nu < 0,5$ , из которого и получается условие (8.7). Этот способ устранения резонансных колебаний называется *частотной отстройкой* (рис. 8.7).

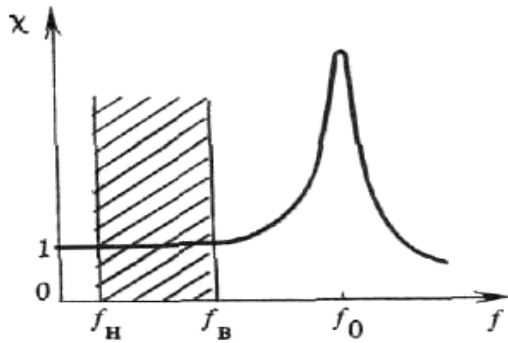


Рис. 8.7. Амплитудно-частотная характеристика при увеличении жесткости конструктивных элементов

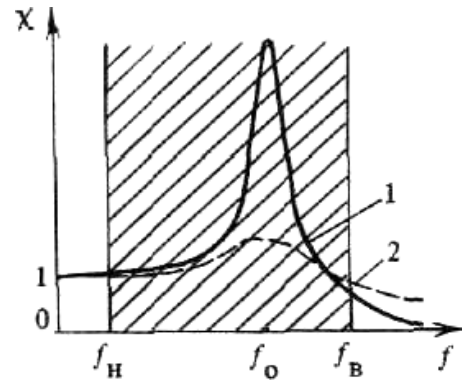


Рис. 8.8. Амплитудно-частотные характеристики при увеличении степени демпфирования конструктивного элемента: 1 – слабое демпфирование; 2 – увеличенное демпфирование

## 8.2. Частотная отстройка

Обычно этим способом защищают ячейки ЭС. Несущим элементом ячейки является пластина – печатная плата. Чтобы исключить резонанс, необходимо вывести собственную частоту ячейки за пределы диапазона частот возмущающих вибраций (рис. 8.8). Для этого необходимо увеличить жёсткость элементов и уменьшить массу. Для ПП расчётная формула собственной частоты может быть записана в общем виде

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m'}}$$

где  $D$  – цилиндрическая жёсткость конструкции;

$m'$  – распределённая масса конструкции  $m' = m/a \cdot b$ ;

$m$  – масса пластины;

$\alpha$  – коэффициент закрепления;

$a$  – длина пластины;

$b$  – ширина пластины.

Для случая расчёта стальной пластины можно воспользоваться упрощённой формулой

$$f_0 = \frac{ch}{a^2} 10^4,$$

где  $c$  – коэффициент закрепления, выбирается из таблиц в зависимости от варианта закрепления и соотношения сторон платы;

$h$  – толщина пластины и  $a$ , вводят в сантиметрах.

$$f_0 = \frac{ch}{a^2} 10^4 \cdot K_h \cdot K_b,$$

где  $K_h$  – поправочный коэффициент на материал платы.

$$K_h = \sqrt{\frac{E_{\text{П}} \rho_{\text{П}}}{E_{\text{С}} \rho_{\text{С}}}},$$

индексы С – сталь, П – плата;

$K_b$  – поправочный коэффициент на массу элементов на плате;

$$K_b = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_{\text{Э}}}{m_{\text{П}}}}},$$

$$m_{\text{П}} = \rho_{\text{П}} \cdot a \cdot b \cdot h,$$

где  $\rho_{\text{П}}$  – плотность материала платы.

Для обеспечения вибропрочности ячейки предлагают:

- 1) увеличить толщину платы;
- 2) уменьшить размер платы;
- 3) увеличить жёсткость крепления платы.

Жёсткость крепления платы возрастает, если ее закрепить не только с одной стороны, но и обеспечить жёсткое защемление с нескольких сторон, лучше по всему периметру, либо используя рамочную конструкцию с ребрами жесткости, и так далее. Увеличение жесткости конструкции приводит и к значительному увеличению ее массы, а поэтому частотную отстройку обычно применяют, если частоты возбуждающих колебаний не превышают 500 Гц.

### **8.3. Основы расчёта вибропрочности ячеек МЭА с теплоотводящим основанием**

Ячейки микронэлектронной аппаратуры можно выполнить, используя в качестве несущего элемента жёсткое теплоотводящее основание. В таком случае получаем двухслойную пластинчатую конструкцию, у которой цилиндрическая жёсткость  $D$  равна сумме жёсткостей платы и теплоотводящего основания. Остальной математический аппарат остается прежним.



## 8.4. Виброизоляция устройств и приборов. Особенности виброизоляторов

На практике часто возникают ситуации, когда амплитуды возбуждающих колебаний, задаваемые нормативно-технической документацией, превышают допустимые для ЭРЭ или других элементов конструкции.

Это требует изоляции изделия от виброактивного основания с целью обеспечения условия  $\mu < 1$ , что достигается в *зарезонансной области* (рис. 8.9), когда  $\nu > \sqrt{2} = 1,41$ . Для обеспечения эффективной *виброизоляции*, когда  $\mu < 0,1 - 0,2$ , необходимо выполнить условие  $f/f_0 > 4 \div 5$ .

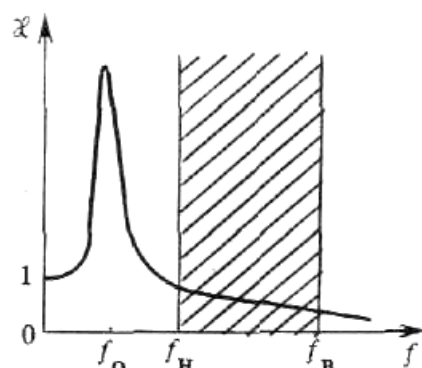


Рис. 8.9. Амплитудно-частотная характеристика виброизолированного объекта

Представляет интерес график зависимости угла сдвига фаз  $\alpha$  между перемещениями основания и системы. Для нахождения такой зависимости на рис. 8.10 представлена векторная диаграмма сил, действующих на систему. При составлении диаграммы считалось, что в рассматриваемый момент времени система двигалась вертикально вверх. Вектор силы инерции, равный  $m\omega^2 S_0$  (см. уравнение (8.5)), совпадает с направлением движения. Вектор силы упругости, равный  $kS_0$ , имеет противоположное направление. Вектор диссипативной силы  $k\eta S_0$  опережает вектор силы упругости на  $90^\circ$ . Перемещение основания опережает перемещение системы на угол  $\alpha$ , вектор силы упругости  $kS_{a0}$  совпадает с направлением перемещения основания  $Z_A$ , а вектор диссипативной силы  $k\eta S_{a0}$  опережает вектор силы  $kS_{a0}$  на  $90^\circ$ . Суммы всех сил, а следовательно, и их проекции на оси координат, равны нулю. Следовательно, для проекции сил на вертикальную и горизонтальную оси можно написать соответствующие уравнения

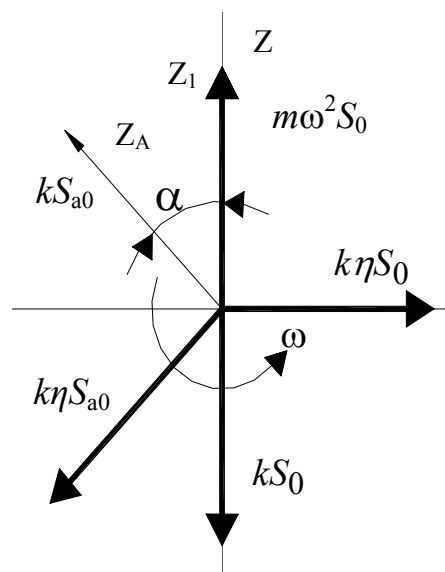


Рис. 8.10. Векторная диаграмма сил

$$m\omega^2 S_0 + kS_{a0} \cos \alpha = kS_0 + k\eta S_{a0} \cos(90^\circ - \alpha),$$

$$k\eta S_0 = k\eta S_{a0} \cos \alpha + kS_{a0} \cos(90^\circ - \alpha).$$

Решая совместно эти уравнения, найдем:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\eta v^2}{(1 - v^2 + \eta^2)}. \quad (8.8)$$

Из графиков на рис. 8.11, построенных на основе этого выражения, видно, что при резонансе сдвиг фаз между виброперемещением основания и системы равен  $\pi/2$ , при  $v > \sqrt{2}$  сдвиг фаз приближается к  $\pi$ , то есть колебания становятся противофазными, чем и объясняется эффект виброизоляции.

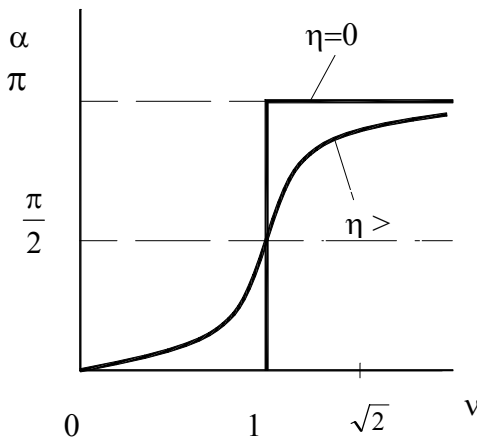


Рис. 8.11. Фазовая характеристика

Эффективность использования виброизоляторов пояснена амплитудно-частотной характеристикой, изображенной на рис. 8.6. Данный способ виброзащиты наиболее эффективный из всех рассмотренных, так как только он обеспечивает получение значения коэффициента передачи колебаний  $\mu < 1$ .

### Кинематическое негармоническое возбуждение колебаний

Уравнение (8.2) можно привести к виду

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + kz = kz_a + b\dot{z}_a. \quad (8.9)$$

Негармонические колебания основания (см. рис. 8.5) представим в виде комплексного ряда Фурье  $z_a = \sum_{i=0}^{\infty} Z_{ai} e^{j\omega_i t}$  ( $\omega_i = i\omega$ ).

Тогда колебания системы

$$z = \sum_{i=0}^{\infty} Z_i e^{j(\omega_i t + \alpha_i)}. \quad (8.10)$$

Подставляя выражение для  $z_a$  и  $z$  в уравнение (8.9), получим:

$$m \sum (j^2 \omega_i^2) Z_{0i} e^{j\omega_i t} + b \sum (j\omega) Z_{0i} e^{j\omega_i t} + k \sum Z_{0i} e^{j\omega_i t} =$$

$$= k \sum Z_{ai} e^{j\omega_i t} + b \sum (j\omega_i) Z_{ai} e^{j\omega_i t}.$$

Это уравнение справедливо, если оно выполняется для каждой  $i$ -й частоты, то есть должно быть

$$Z_{oi}(-m\omega_i^2 + jb\omega_i + k) = Z_{ai}(k + jb\omega_i).$$

Отсюда получим

$$Z_i = \frac{k + jb\omega_i}{k - m\omega_i^2 + jb\omega_i} Z_{ai}.$$

Подставляя это выражение в (8.10), имеем:

$$z = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k + jb\omega_i}{k - m\omega_i^2 + jb\omega_i} z_{ai} e^{\omega_i t}.$$

Модуль этого выражения равен амплитуде колебаний системы.

Учитывая, что  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  и  $\eta = \beta\omega_0/k$ , вычисляем:

$$Z_o = |z| = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sqrt{1 + \eta_i^2 \frac{\omega_i^2}{\omega_o^2}}}{\sqrt{(1 - \frac{\omega_i^2}{\omega_o^2})^2 + \eta_i^2 \frac{\omega_i^2}{\omega_o^2}}} Z_{ai}.$$

Если одна из частот спектра  $\omega_i$  будет совпадать с собственной частотой системы  $\omega_o$ , то член ряда, когда  $\omega_i = \omega_o$ , будет значительно превышать другие члены и

$$Z_o \approx \frac{\sqrt{1 + \eta^2}}{\eta} Z_{ao}.$$

Коэффициент передачи

$$\mu = \frac{Z_o}{Z_{ao}} = \frac{\sqrt{1 + \eta^2}}{\eta}$$

совпадает с (8.4) при  $\nu = 1$ .

Следовательно, при воздействии негармонического возбуждения реакция системы практически равна реакции системы при гармоническом воздействии с частотой, равной собственной частоте колебаний.

### **Особенности виброизоляторов**

Электронные средства подвижных объектов подвергаются действию вибраций от работы двигателей и от возмущающих факторов

движения в широком диапазоне частот, а также ударным нагрузкам с большими значениями ускорений.

Обеспечить частотную отстройку для всех элементов конструкции оказывается сложным, поэтому решают задачу защиты аппарата в целом установкой его на виброизоляторы (амортизаторы). Виброизоляторы должны обеспечить уменьшение амплитуды вибрации и их ускорений в большей части диапазона частот вибраций на объекте. Кроме того, они должны выдерживать ударные нагрузки на объекте и обеспечить демпфирование, т. е. поглощение энергии удара.

Выпускаемые промышленностью виброизоляторы характеризуются жёсткостью и демпфированием. Жёсткость виброизолятора определяет упругие свойства и оценивается коэффициентом жёсткости, который при статической нагрузке рассчитывается по формуле:

$$K = F/X,$$

где  $F$  – сила нагрузки;  $X$  – величина деформации.

Кроме упругого элемента виброизолятор имеет демпфер и обладает демпфированием, т. е. поглощением энергии механических колебаний.

Демпфирование оценивается коэффициентом демпфирования

$$\beta = \frac{F}{\frac{\partial x}{\partial t}} = \frac{F}{\dot{x}}.$$

В зависимости от метода демпфирования виброизоляторы бывают:

1. **Жидкостного демпфирования** (рис. 8.12).

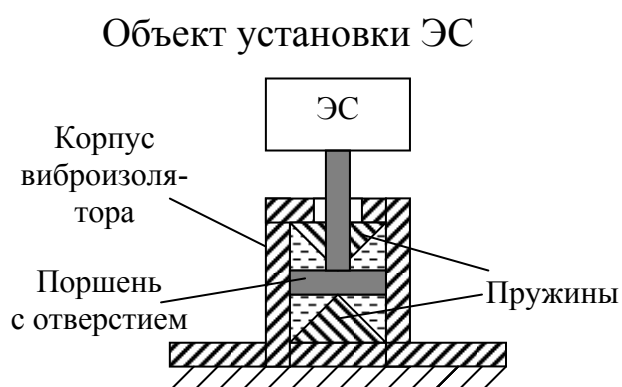


Рис. 8.12. Виброизоляторы жидкостного демпфирования

В виброизоляторах жидкостного демпфирования энергия поглощается на перекачку жидкости через отверстия малого диаметра в

поршне. В качестве жидкости применяют смеси различных компонентов большой вязкости и высокой морозоустойчивости, например спиртоглицериновая смесь. Такие виброизоляторы рассчитаны на большие нагрузки  $F$  и применяются в основном для виброизоляции конструкций больших масс.

2. **Воздушного демпфирования** применяются на меньшие нагрузки (рис. 8.13).

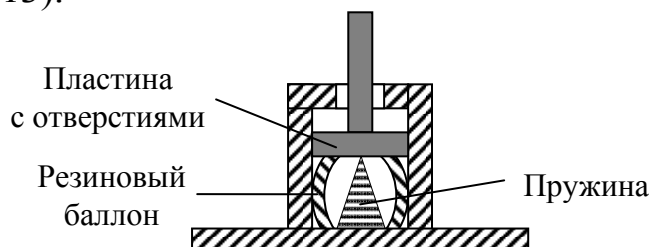


Рис. 8.13. Виброизоляторы воздушного демпфирования

В виброизоляторах воздушного демпфирования энергия механических воздействий расходуется на перекачку воздуха из резинового блока через отверстия малого диаметра в верхнем металлическом фланце баллона. Промышленность выпускает такие виброизоляторы марки АД. Они относятся к разряду мягких, допускают в основном нагрузки по вертикали и небольшие нагрузки в горизонтальной плоскости.

3. **Фрикционного демпфирования.** В виброизоляторах фрикционного демпфирования энергия механических воздействий превращается в тепловую энергию трения поршня о стенки цилиндра. Промышленность выпускает такие виброизоляторы марки АФД (амортизатор фрикционного демпфирования), АПН (амортизатор пространственного нагружения). Виброизоляторы фрикционного демпфирования обладают большей жёсткостью, чем виброизолятор воздушного демпфирования, так как имеют две жёсткие пружины. Могут применяться в условиях сильного разрежения воздуха, а также высоких и низких температур эксплуатации.

4. **Гистерезисного демпфирования.** В системах виброизоляции может использоваться принцип гистерезисного демпфирования. Гистерезисное демпфирование имеет место в резино-металлических виброизоляторах, когда используются гистерезисные свойства резины (рис. 8.14).

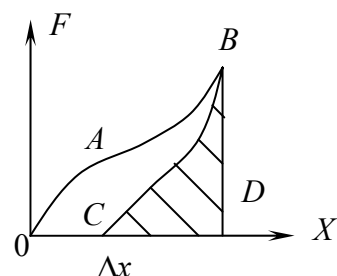


Рис. 8.14. Гистерезисное демпфирование

Если приложить к резиновому жгуту силу  $F$ , то имеем деформацию – удлинения по кривой  $OAB$ . Если снять нагрузку, то жгут сжимается по кривой  $BC$  и имеет место остаточная деформация  $\Delta x$ . Энергия, затраченная на деформацию жгута  $S_{OABD}$ , больше чем энергия, возвращённая  $S_{BDC}$ , следовательно, площадь петли, а именно  $OABC$ , определяет потерю механической энергии в резиновом элементе.

Промышленность выпускает резинометаллические виброизоляторы (рис. 8.15) марки АП (плоский), а также АЧ (чашкообразный).

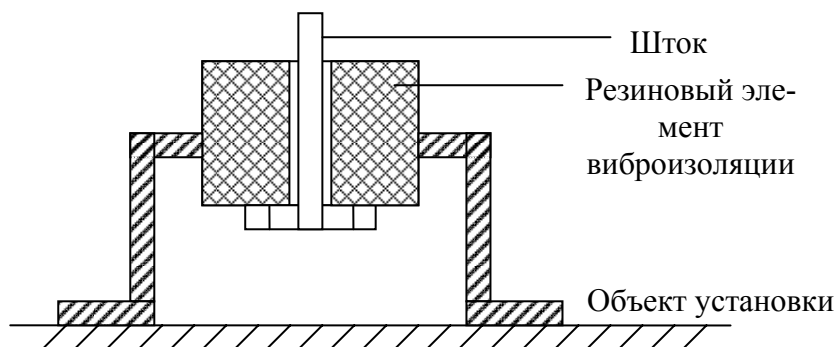


Рис. 8.15. Резинометаллические виброизоляторы

Виброизолятор типа АЧ представлен на рис. 8.15. Эти виброизоляторы просты по конструкции, достаточно жесткие, но не относятся к морозоустойчивым, так как резиновый демпферный элемент на низких температурах становится жестким, что ухудшает качество демпфирования.

### Принцип действия системы виброизоляции

Чтобы исследовать принцип работы виброизолятора, необходимо рассмотреть систему аппарат – виброизоляторы при наличии возмущающего воздействия вибрации (рис. 8.16).

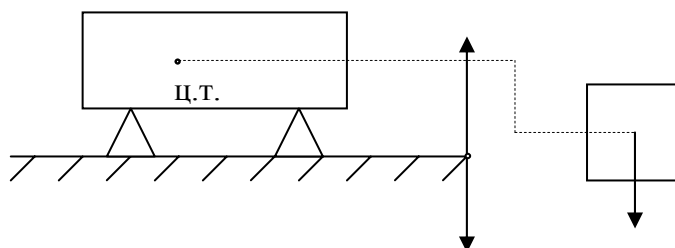


Рис. 8.16. Принцип работы виброизолятора

Пусть на основание аппарата воздействует вибрация, которая имеет амплитудное значение  $A_0$  с частотой  $\omega$ .

$$a = A_0 \cdot \sin \omega t .$$

Нас интересует амплитуда и частота движения аппарата на виброизоляторах. Рассмотрим мгновенное положение аппарата, когда основание сместилось вниз, а аппарат на виброизоляторах сместился на величину  $x$ . В этом случае аппарат испытал силу перегрузки

$$F = M \cdot \ddot{x} , \quad \text{где} \quad \ddot{x} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} .$$

В этом случае виброизоляторы деформированы и с их стороны возникают две силы реакции:

1. Сила реакции от жёстких сжатых пружин:  $F_1 = k(x - a)$ , где  $a$  – виброперемещение основания;  $k$  – жесткость системы виброизоляции, которая равна сумме жесткостей виброизоляторов.

2. Сила реакции демпфера  $F_2 = R(\dot{x} - \dot{a})$ , где  $\dot{x}$ ,  $\dot{a}$  – скорости движения аппарата и основания.

В условиях установившегося процесса движения сумма сил, действующих на аппарат, равна 0, а значит:

$$M\ddot{x} + R(\dot{x} - \dot{a}) + k(x - a) = 0 .$$

Мы получили уравнение движения аппарата, из решения которого можно найти виброперемещение  $x$ , скорость  $\dot{x}$  и ускорение  $\ddot{x}$  аппарата на виброизоляторах.

Из решения этого уравнения следует (рис. 8.17):

1. Аппарат совершает вибрации-колебания на виброизоляторах с частотой  $\omega$  возмущающих воздействий на основании.

2. Амплитуда виброперемещения аппарата  $x$  может быть меньше амплитуды  $a$  движения основания, может быть и больше, всё зависит от соотношения частот  $\omega$ ,

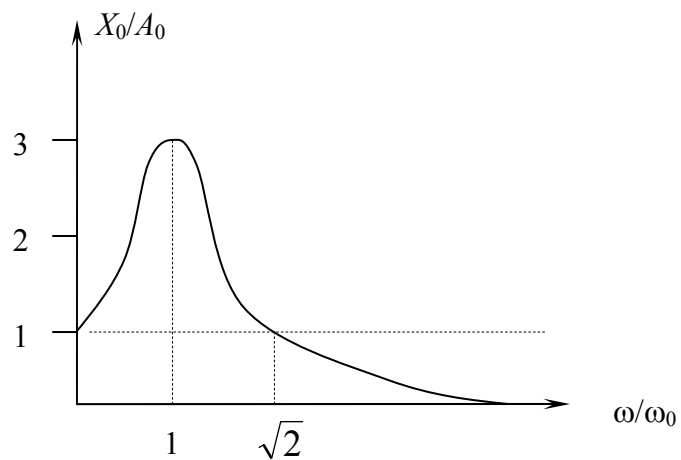


Рис. 8.17. АЧХ блока на виброизоляторах

возмущающих вибраций собственной частоты системы виброизоляции  $\omega_0$ .

3. Система виброизоляции имеет собственную резонансную частоту, которая определяется решением уравнения и имеет значение

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}},$$

где  $K$  – жёсткость системы виброизоляции;  $M$  – масса нагружения системы – (масса аппарата).

Следовательно, когда  $\omega = \omega_0$ , имеем резонанс и усиление амплитуды вибрации, а когда  $\omega > \omega_0$  будем иметь ослабление амплитуды вибраций.

Можно видеть, что виброизоляция имеет место на частотах вибрации, которые больше собственной частоты системы в  $\sqrt{2}$  раз.

$$\omega_g > \omega_0 \cdot \sqrt{2},$$

где  $\omega_g$  – верхняя частота возмущающей вибрации, от которой начинается ослабление амплитуд вибраций.

### ***Особенности выбора виброизоляторов***

Аппаратура подвижных объектов испытывает вибрации, удары различных частот и ускорений. Выбор виброизоляторов против вибрации и против ударов имеет противоречие по предъявляемым требованиям к виброизоляторам (рис. 8.18). Для виброзащиты предпочтительно применить мягкие виброизоляторы.

Так как  $\omega_0 > \frac{\omega_B}{\sqrt{2}}$ ,

$$\sqrt{\frac{K}{M}} \leq \frac{\omega_B}{\sqrt{2}}.$$

Следовательно, чем меньше жесткость  $K$ , тем лучше выполняется это условие. Если виброизолятор мягкий, то условие виброзащиты выполняется для широкого диапазона частот  $\omega_B$ . Мягкий виброизолятор, например АД, имеет собственную резонансную частоту 8...10 Гц, следовательно, обеспечивает виброизоляцию на частотах 14 Гц и выше.



Если виброизолятор жёсткий, например фрикционного демпфирования, то у него собственная резонансная частота 20...25 Гц. А значит, виброизоляция будет иметь место на частотах 30...35 и выше Гц. Можно видеть (рис. 8.18), что жёсткий виброизолятор не ослабляет, а усиливает нижние и даже средние частоты вибрации до 30 Гц.

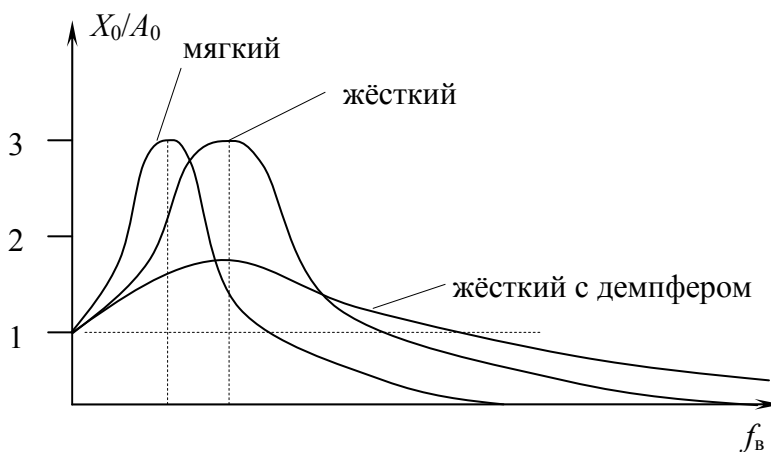


Рис. 8.18. Использование виброизоляторов различной жесткости

В том же случае, когда имеют место ударные воздействия, приходится выбирать жёсткие виброизоляторы, так как мягкие не выдерживают ударных перегрузок. Однако в этом случае ухудшаются условия виброизоляции для возмущающих воздействий вибрации в диапазоне низших и средних частот. Поэтому, чтобы у жёстких виброизоляторов уменьшить резонансную амплитуду при вибрациях, необходимо выбирать жёсткие виброизоляторы с демпфированием (см. рис. 8.18).

Следовательно, виброизоляторы выбирают, исходя из условий вибраций и ударов компромиссно, с учётом климатических условий эксплуатации. Например, для самолётной аппаратуры следует выбирать виброизоляторы жёсткие, так как при посадке самолёта имеют место удары с ускорением 10g. Предпочтительно, чтобы виброизоляторы обладали демпфированием. Резинометаллические виброизоляторы не рекомендуются, так как температурах эксплуатации  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  резина становится жёсткой, слабодемпфирующей. Виброизоляторы воздушного демпфирования не рекомендуются, так как при полётах на высоте давление может быть 5 мм рт. ст., т. е. воздух отсутствует. Следовательно, для самолетных ЭС наиболее предпочтительны виброизоляторы фрикционного демпфирования (АФД или АПН).

Самыми простыми по конструкции и эксплуатации являются резинометаллические виброизоляторы или даже волосяные резиновые коврики под аппарат.

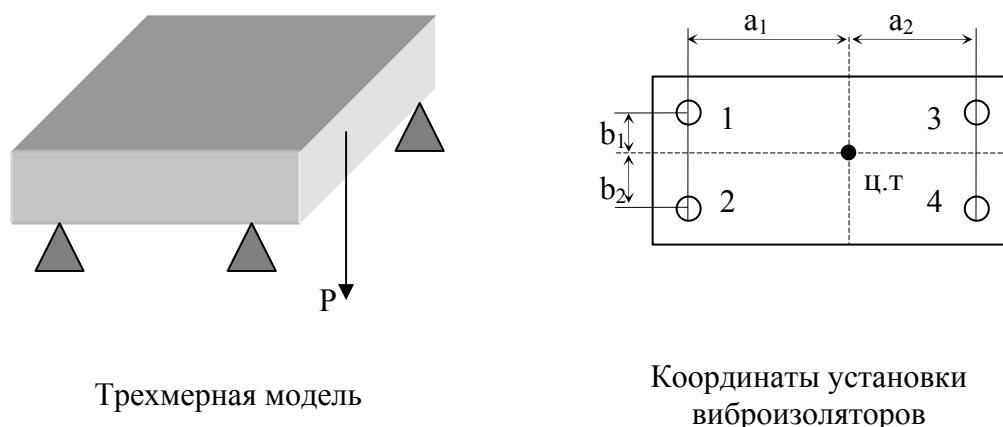
Однако система виброизоляции в этом случае имеет недостатки:

- система достаточно жёсткая, а поэтому не обеспечивает виброизоляцию на нижних частотах возмущающих воздействий;
- при отрицательных температурах эксплуатации у резины увеличивается жесткость, а значит, увеличивается и собственная частота и ухудшается виброизоляция на средних и низших частотах (до 50 Гц);
- с увеличением жесткости резины ухудшается ее демпфирование, а значит, увеличивается амплитуда виброперемещения на низших и средних частотах.

Подобная система не применяется при очень низких температурах эксплуатации. Для резинометаллических виброизоляторов типов АП, АЧ предельная температура морозоустойчивости  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Резинометаллические виброизоляторы применяют для ЭС подвижных объектов, когда морозоустойчивость должна быть не ниже  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### ***Выбор типоразмера виброизолятора (статический расчет)***

Конкретный типоразмер виброизолятора выбирается исходя из нагрузки от силы тяжести аппарата на каждый виброизолятор (рис. 8.19).



*Рис. 8.19. Блок на виброизоляторах*

Нагрузка, приходящаяся на каждый виброизолятор, при размещении центра тяжести аппарата на пересечении осей симметрии основания определяется по формуле

$$P_i = \frac{P}{n},$$

где  $n$  – количество виброизоляторов,  $P$  – сила тяжести аппарата.

Если центр тяжести аппарата смещён относительно осей симметрии основания (см. рис. 8.19), то нагрузка на каждый виброизолятор рассчитывается по формулам:

$$P_1 = P \frac{a_2 b_2}{(a_1 + a_2)(b_1 + b_2)},$$

$$P_2 = P \frac{a_2 b_1}{(a_1 + a_2)(b_1 + b_2)},$$

$$P_3 = P \frac{a_1 b_2}{(a_1 + a_2)(b_1 + b_2)},$$

$$P_4 = P \frac{a_1 b_1}{(a_1 + a_2)(b_1 + b_2)}.$$

По рассчитанным статическим нагрузкам выбирается типоразмер каждого виброизолятора так, чтобы реальная его нагрузка была примерно равна номинальной нагрузке выбираемого виброизолятора.

$$P_{\min} < P_i < P_{\max},$$

где  $P_{\min}$ ,  $P_{\max}$  (максимальная и минимальная допустимые нагрузки выбираемого виброизолятора).

Виброизолятор должен быть загружен больше минимально допустимой нагрузки, так как в противном случае он будет недогружен, а значит, система будет жёсткой, поэтому будет усиливать низкие и даже средние частоты вибрации.

В то же время нагрузка на виброизолятор не должна превышать предельно максимальную, так как виброизолятор может быть разрушен от перегрузки.

### 8.5. Динамическое гашение колебаний

Динамический гаситель в качестве средства защиты известен давно и используется в случае необходимости защиты объектов от вибраций, характеризующихся постоянной частотой. Динамические гасители применяются также для улучшения динамических характеристик объектов и при ударных воздействиях. Динамический вибро-

гаситель в простейшем случае представляет собой массу  $m$ , закрепленную с помощью упругого элемента (пружины) жесткостью  $k_2$  к объекту защиты (рис. 8.20). Подбором

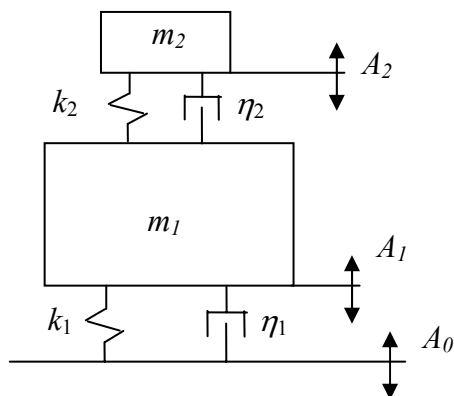


Рис. 8.20. Динамический виброгаситель

величины массы  $m_2$  и величины жесткости пружины  $k_2$  обеспечивается такой режим колебаний, при котором амплитуда колебаний объекта  $A$  минимальна на частоте возмущающих колебаний с амплитудой  $A_0$ . Однако ввиду своей сильной частотной избирательности этот способ виброзащиты не нашел широкого распространения при организации защиты блоков, установленных на подвижных объектах, так как подобные условия эксплуатации не являются типичными для ЭС.

Вместе с широким использованием пассивных способов виброзащиты в ряде случаев применяют активные системы виброзащиты, которые могут строиться на основе динамического гасителя колебаний с регулированием величины его упругой связи.

Для построения систем активной виброзащиты (рис. 8.21) требуются устройства автоматического регулирования, датчики, корректирующие звенья, источники энергии и исполнительные устройства.

Роль корректирующих звеньев, формирующих управляющий сигнал (УС) в системах активной виброзащиты, могут выполнять микропроцессоры, а исполнительные устройства могут быть электрическими, пневматическими и гидравлическими. Два варианта электрических исполнительных устройств систем активной виброзащиты представлены на рис. 8.21.

Так, виброзащита за счет увеличения жесткости конструктивных элементов блоков, которую можно обеспечить применением ребер жесткости, отбортовок, оптимизацией геометрических размеров и другими способами, поясняется с помощью амплитудно-частотной характеристики, представленной на рис. 8.7. Из нее следует, что если известен диапазон частот воздействующих вибраций, например от  $f_n$  до  $f_b$ , то элементы конструкции будут находиться в относительно благоприятных условиях эксплуатации, если вывести их значения собственных частот  $f_o$  из диапазона частот воздействий, обеспечив выполнение соотношения  $f_o > 2f_b$ .

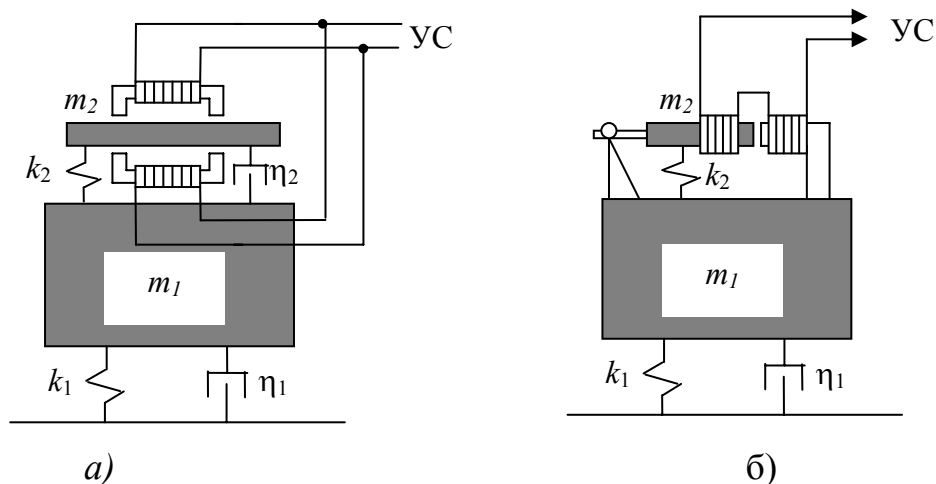


Рис. 8.21. Варианты электрических исполнительных устройств активной виброзащиты: а – с поступательными движениями динамического гасителя колебаний; б – с поворотным якорем

## 8.6. Демпфирование колебаний

Если частотный диапазон возбуждения превышает 500 Гц, то полностью устранить резонансные колебания не удастся, и конструкция будет находиться в области *резонансных колебаний*, когда  $0,5 < f/f_0 < 1,5$ . В этом случае обычно  $\mu \gg 1$ , что недопустимо, так как могут возникать отказы из-за многократного возрастания амплитуд колебаний. Уменьшить амплитуды можно увеличением КМП, то есть увеличением *демпфирующих* свойств конструкции.

Этот способ особенно перспективен для ЭС аэрокосмического комплекса и подробно рассмотрен в [33].

Использование демпфирующих покрытий и слоистых вибропоглощающих конструкций пояснено амплитудно-частотной характеристикой, представленной на рис. 8.8. Из приведенных характеристик следует, что этот способ виброзащиты эффективен в широком диапазоне частот воздействующих вибраций, который может захватывать и область частот собственных колебаний. В этом случае  $\mu > 1$ , но при резонансном возбуждении вибраций конструктивных элементов эффективность виброзащиты наибольшая, что следует из сравнения кривых 1 и 2.

Вибропоглощающие покрытия рекомендуется использовать для плат минимально возможной жесткости с той целью, чтобы минимальная толщина слоя покрытия позволила обеспечить необходимый

отбор энергии при резонансных колебаниях платы. По этой причине рекомендуется изготавливать корпуса с минимально допустимой жесткостью стенок, если предполагается применять в них высокоэффективные вибропоглощающие покрытия.

Кроме рассмотренных выше наиболее употребительных способов виброзащиты, в практике конструирования ЭС используют и другие: соответствующую ориентацию конструктивных элементов относительно направления вектора воздействующих вибраций; размещение наиболее чувствительных элементов блока в местах конструкции, характеризующихся малыми значениями коэффициента передачи колебаний; применение виброустойчивых и вибропрочных ЭРЭ, транзисторов и ИС, элементов компенсации виброшумов, гибких печатных плат и др. Все эти способы виброзащиты также относят к пассивным.

### **8.7. Основы автоматизации выбора способов виброзащиты ЭС**

Задача выбора способов виброзащиты имеет алгоритмическую и неалгоритмическую составляющие. В [32] эта задача представлена в виде алгоритма, который предполагает решение четырех проектных подзадач:

1. Рациональное конструирование.
2. Частотная отстройка.
3. Применение полимерных демпферов.
4. Виброизоляция.

Решение этих подзадач носит неалгоритмический характер, поэтому в этом случае целесообразно применение методов построения базы знаний (БЗ) для экспертных систем. Указанные подзадачи ранжированы в порядке возрастания сложности конструктивных решений, поэтому решать их следует в порядке перечисления (возможно с итерационными циклами).

Рациональное конструирование предполагает, во-первых, рациональную ориентацию ячеек в электронном аппарате или блоке, во-вторых, рациональное размещение ЭРЭ на печатных платах.

Подзадача 2 – частотная отстройка для ячеек на базе печатных плат – предполагает конструктивные меры, приводящие к уводу собственной частоты  $f_0$  колебаний элементов конструкции из диапазона частот вибраций.

Частотную отстройку рекомендуется выполнять путем реализации следующих конструктивных решений:

1. Уменьшать размеры платы, особенно ее длину  $a$ . При выборе размеров платы следует стремиться к использованию плат с соотношением сторон, близким к единице.

2. Увеличивать цилиндрическую жесткость  $D$  конструкции за счет увеличения толщины платы. Однако при этом следует иметь в виду, что с увеличением толщины тонколистовых элементов конструкции увеличивается их масса и выигрыш в увеличении  $f_0$  не столь значителен. Уменьшать массу конструкции можно за счет выбора малогабаритной элементной базы.

3. Увеличивать жесткость конструкции, выбирая вариант и коэффициент  $\alpha$  закрепления платы ( $\alpha$  зависит от соотношения сторон и варианта закрепления). Ниже приведены наиболее распространенные варианты закрепления в порядке возрастания жесткости:

3.1. Одна сторона закреплена жестко, две стороны – свободно оперты.

3.2. Две стороны закреплены жестко, две стороны – свободно оперты.

3.3. Плата жестко закреплена по контуру. В этом случае можно использовать несущую рамку-каркас.

3.4. Плата имеет промежуточные поперечные и продольные крепления. В этом случае также может использоваться рамка-каркас (ребра жесткости).

3.5. Увеличивать жесткость за счет применения многослойной конструкции, например с теплоотводящим основанием.

При выборе указанных проектных решений следует учитывать следующие правила:

1. Если плотность монтажа высокая (более 0,65), то применение ребер жесткости несущей рамки нежелательно.

2. Если верхняя частота вибрации  $f_B$  более 500 Гц, то применение конструктивных решений 3.1 – 3.4 не даст нужного эффекта.

3. Если тепловой режим напряженный, то целесообразно применить проектное решение 3.5.

В случае невозможности частотной отстройки можно попытаться осуществить виброзащиту ЭС применением полимерных демпферов (проектная подзадача 3). Облегчить конструктору решение подзадачи 3

может база знаний «Полимерные демпферы», основное содержание которой отражено на графе решений (рис. 8.22).

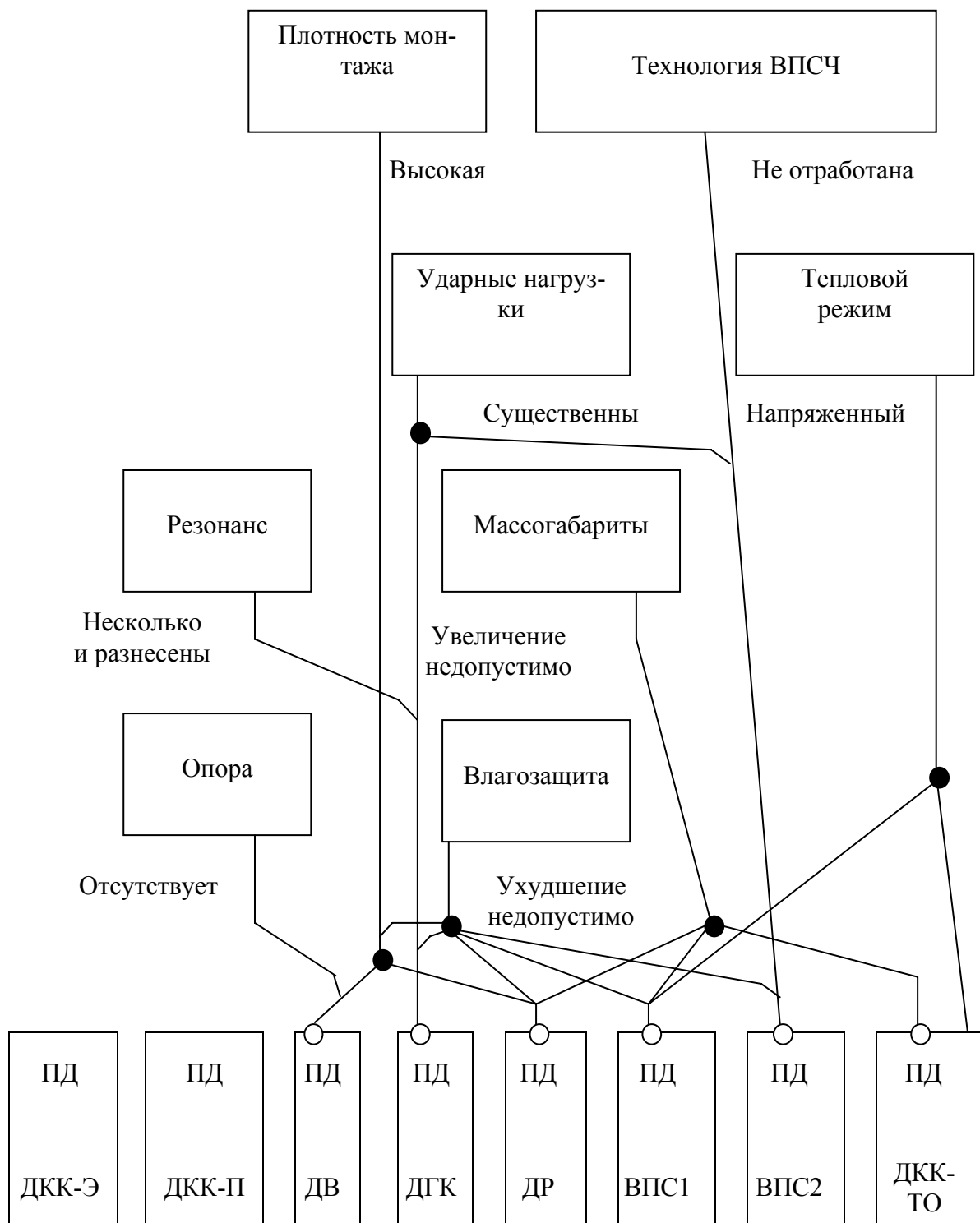


Рис.8.22. Граф решений БЗ «Полимерные демпферы»



Терминальные вершины графа имеют имя ПД (полимерный демпфер). Этот атрибут может принимать следующие значения:

ДКК-Э – крепление ЭРЭ демпфирующим клеем-компаундом к печатной плате.

ДКК-П – крепление печатной платы демпфирующим клеем-компаундом к рамке.

ДВ – демпфирующие вставки.

ДГК – динамический гаситель колебаний.

ДР – демпфирующие ребра.

ВПС1 – внешний вибропоглощающий слой.

ВПС2 – внутренний вибропоглощающий слой.

ДКК-ТО – крепление ЭРЭ демпфирующим клеем-компаундом к теплоотводящему основанию.

При построении графа решений учитывались следующие преимущества и недостатки конструктивных вариантов виброзащиты с применением полимерных демпферов.

Одно из самых эффективных конструктивных решений

$$\text{ПД} = \text{ВПС1}$$

предполагает применение внешнего вибропоглощающего слоя. Однако при этом ухудшается тепловой режим ячейки ЭС, а также затрудняется доступ к элементам ячейки ЭС для контроля и настройки.

Хороший вибропоглощающий эффект имеет внутренний вибропоглощающий слой

$$\text{ПД} = \text{ВПС2.}$$

Однако это сложный и дорогостоящий способ, так как конструкция с внутренним вибропоглощающим слоем, по сути, является многослойной печатной платой, в которой трудно выполнить металлизированные отверстия и обеспечить необходимую надежность конструкции.

Применение демпфирующих ребер серьезно увеличивает массу ячейки ЭС и ее площадь. Если частоты вибрации разнесены, то возможно потребуются ставить демпфирующие ребра вдоль и поперек платы.

Демпфирующие вставки и динамический гаситель колебаний занимают немного площади ячейки, не слишком увеличивают массу конструкции, однако это демпферы с сосредоточенными параметрами, и поэтому если в спектре вибрации содержится несколько резо-

нансных частот и они разнесены, то применение ДГК и ДВ становится проблематичным.

И, наконец, при выборе ПД следует учитывать его возможную гигроскопичность. Если гигроскопичность имеет место, то следует применять влагозащитные покрытия или другие конструктивные решения, например, исполнять динамический гаситель колебаний в герметичном корпусе.

Граф решений для базы знаний «Полимерные демпферы» имеет следующие особенности:

1. Вершины графа, обозначенные сплошными кружками, имеют дочерние И-вершины.

2. Пустые кружки на терминальных вершинах графа означают нецелесообразность применения соответствующих проектных решений. Например, одно из производственных правил имеет вид:

ЕСЛИ Плотность монтажа = Высокая  
ТО NOT ( ПД = ДР  $\vee$  ПД = ДВ),

т. е. если плотность монтажа высокая, то применение демпфирующих ребер и демпфирующих вставок не рекомендуется.

Таким образом, база знаний «Полимерные демпферы» при заданных конструктивных требованиях и условиях эксплуатации (плотность монтажа, тепловой режим и др.) из всего многообразия проектных решений оставит на усмотрение конструктора их ограниченный круг.

### *Виброудароизоляция*

Если все рассмотренные способы виброзащиты оказались недостаточно эффективны, то применяют виброудароизоляцию ЭС. При проектировании виброудароизоляции решают две основные задачи:

- выбор типа виброизоляторов (ВИ);
- выбор типоразмеров ВИ.

Структуру базы знаний по выбору типа ВИ удобно представить в виде графа решений (рис. 8.23).

Все виброизоляторы можно свести к четырем основным типам, которые образуют терминальные вершины графа решений:

- Возд – виброизоляторы воздушного демпфирования;
- Жидк – жидкостные ВИ;
- Фрик – фрикционные ВИ;
- Гистер – гистерезисные ВИ.



Рис.8.23. Граф решений БЗ «Виброизоляция ЭС»

Для выбора типа ВИ определены семь атрибутов выбора, которые принимают следующие значения:

1. Резонансная частота (выведена, не выведена);
2. Виброускорение (допустимое, недопустимое);
3. Ударные нагрузки (существенные, несущественные);
4. Атмосферное давление (нормальное, низкое);
5. Нагрузки в горизонтальной плоскости (незначительные, значительные);
6. Статическая нагрузка (большая, небольшая);
7. Морозовоздействие (есть, нет).

Как видно, все атрибуты выбора представляют собой лингвистические переменные, что соответствует технологиям экспертных систем.

На основе графа решений легко получить продукционные правила, составляющие базу знаний.

Пример продукционного правила:

ЕСЛИ (Резонансная частота = Не выведена) &  
(Виброускорение = Недопустимое) &  
((Ударные нагрузки = Существенные) ∨  
(Ударные нагрузки = Несущественные) &  
(Атмосферное давление = Нормальное) &  
(Нагрузка в горизонтальной плоскости = Значительная)) &  
(Статическая нагрузка = Небольшая) &  
(Морозовоздействие = Нет)  
ТО (Тип ВИ = Гистер).

### Контрольные вопросы

1. Вибрации и удары при эксплуатации ЭС, основные параметры и их влияние.
2. Деформации элементов от ударов и вибраций, конструктивные методы их уменьшения.
3. Почему увеличивается жесткость и уменьшается деформация прогиба тонколистовых элементов при наличии отбортовок?
4. Резонансы элементов конструкции при наличии вибраций и методы борьбы с ними.
5. Какие методы обеспечения частотной отстройки ячеек ЭС вы знаете? В чем проблема ее исполнения на высоких частотах возмущающей вибрации для самолетной аппаратуры?

6. Назовите методы уменьшения резонансных амплитуд колебаний ячеек ЭС и обеспечения прочности крепления электрорадиоэлементов и микросхем.

7. Виброизоляция устройств и приборов ЭС, разновидности виброизоляторов по принципу действия и по конструкции.

8. Проблемы и компромиссы выбора виброизоляторов при наличии вибраций и ударов при эксплуатации.

9. Какими методами решается задача автоматизации выбора способа виброзащиты ЭС?

10. Каковы атрибуты выбора решений базы знаний «Полимерные демпферы»?

## **9. ВЛАГОЗАЩИТА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

### **9.1. Влияние влаги на ЭС и общие методы влагозащиты**

Электронные средства различных классов испытывают влаговоздействие в различных видах и значениях:

1. Повышенная относительная влажность при эксплуатации. Например, для самолётной аппаратуры 98 % при температуре +40 °С.

2. Брызго- и водовоздействие при эксплуатации аппаратуры, например носимая аппаратура – интенсивность брызг 5 мм/мин, слой воды 50 см.

Влага отрицательно действует на ЭРЭ и элементы конструкции, содержащие гигроскопические диэлектрики. Гигроскопические диэлектрики (гетинакс) впитывают влагу и изменяют электрическую прочность, увеличивают диэлектрические потери. Влага запылённая, загрязнённая кислотами, щелочами является токопроводящей. Поэтому при проектировании аппаратуры, работающей в условиях повышенной влажности, водо- и брызговоздействия, рекомендуется не применять гигроскопические диэлектрики. Применяют стеклотекстолит и керамику для несущих элементов конструкций.

Если же ЭРЭ и узлы конструкций содержат гигроскопические диэлектрики, то применяют следующие методы их защиты:

1. Покрывают поверхность таких элементов влагозащитным лаком, эмалями, компаундами. Например, плату с элементами покрывают лаками (СБ-1С, УР-231). Для влагозащиты и виброударозащиты печатных плат конструкции ячеек могут заливать эластичным демфирующим компаундом (например пенополиуретаном).

2. Пропитка ЭРЭ и узлов, содержащих гигроскопичные материалы, лаками. Пропитывают катушки дросселей, трансформаторов, индуктивности ВЧ и НЧ, так как в этом случае увеличивается электрическая прочность между витками.

3. Заливка конструкции жидкими или затвердевающими компаундами.

Указанные методы влагозащиты ухудшают условия охлаждения ЭС, а поэтому должны предлагаться методы интенсификации охлаждения за счёт теплопроводности конструкции или теплопроводности влагозащитного материала.

Указанные параметры влажности и влаговоздействия отрицательно воздействуют также на металлические конструкции, вызывая их коррозию.

Поэтому при конструировании предлагают:

1. Применять металлические несущие конструкции, которые слабо окисляются. Например, применяют нержавеющие стали 10Х14Г14Н4Т, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т и др., металлы, создающие окисную плёнку, которая является защитной от дальнейшего разрушения (алюминий, сплавы алюминия).

2. Защищают металлические конструкции, которые подвергаются коррозии, защитными металлическими и неметаллическими покрытиями. Например, стальные несущие конструкции автомобильных ЭС часто подвергают цинкованию. Цинковое покрытие неустойчиво к воздействию морской влаги, поэтому для корабельной аппаратуры используют кадмиевое или оловянно-висмутовое покрытие. Из неметаллических покрытий широко применяют окисные покрытия на алюминий и алюминиевые сплавы и лакокрасочные покрытия.

3. Высокая влажность особенно опасна при повышенных температурах эксплуатации, так как в этом случае значительно возрастает скорость коррозии. Возникает контактная коррозия в месте контактирования двух металлических элементов с большой разницей электрохимических потенциалов металлов. Не допускается контактирование

двух металлов с большой разницей электрохимических потенциалов (например медь с алюминием). Если же необходимо иметь контактирование элементов из таких материалов, то приходится разделять их элементом из материала-посредника. Например, для заземления алюминиевого экрана либо корпуса ЭС медными проводами или шинами применяют биметаллические лепестки.

В тех случаях, когда имеем брызговодействие, водовоздействие или бескорпусную элементную базу (микросборки), применяют герметизацию ячеек, блоков или аппарата в целом.

## 9.2. Герметизация ЭС. Основы проектирования

При конструировании герметичных корпусов ЭС исходят из условий надёжности герметизации, которую можно оценить временем натекания газа или воздуха. При конструировании герметичных корпусов и соединений следует иметь в виду следующие отрицательные факторы воздействия:

- герметичные корпуса испытывают деформации за счёт возможного перепада давления внутри и вне корпуса;
- герметичный корпус неразъёмный (паяный или сварной) не обеспечивает удобства ремонта, регулировки и настройки аппаратуры. Поэтому для ремонтируемых, регулируемых устройств применяют разъёмные герметичные корпуса, при этом чем меньше разъёмных соединений в корпусе, тем больше его время натекания.

Чтобы исключить деформацию стенок гермокорпуса при перепадах давления внутри и вне корпуса, выбирают материал и толщину стенок, исходя из допустимой деформации стенок.

Толщина стенок (в метрах) может быть рассчитана по формуле

$$t = \sqrt[3]{\frac{0,0284 \cdot Pa^4}{Ef \left(1 + 1,056 \frac{a^5}{b^5}\right)}}$$

где  $E$  – модуль упругости материала конструкции, Па;

$f$  – допустимый прогиб стенки, м;

$a$  и  $b$  – размеры стенок корпуса, м;

$P$  – перепад давлений внутри и вне стенки, Па.

В конструкции ЭС корпус герметизации часто используется как экранирующий, поэтому в зависимости от частоты выбирают металлический корпус, изготовленный из стали, алюминия или латуни.

Неразъёмные корпуса герметизации исполняют либо сварными, либо паяными в зависимости от толщины стенки и выбранного материала. Малогабаритные тонкостенные конструкции гермокорпусов чаще всего исполняют паяными. Для паяных корпусов рекомендуют тонколистовые материалы: сталь 0,3...0,5 мм, алюминий, латунь 0,3...0,8 мм.

Такой корпус состоит из основания корпуса и крышки (рис. 9.1). Крышка пропаивается по периметру.

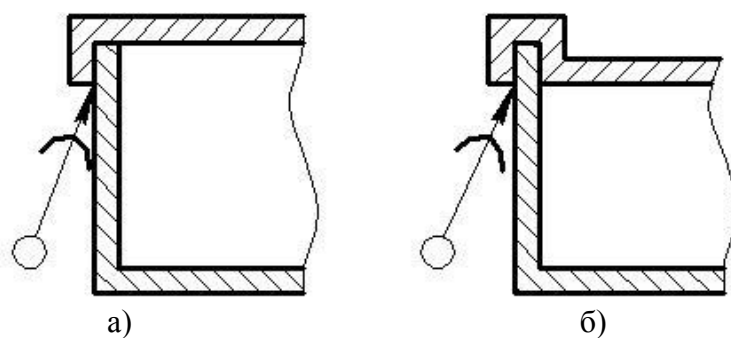


Рис. 9.1. Герметизация пайкой

Более надёжные паяные соединения получают при соединении крышки с корпусом в фальц (рис. 9.1, б). В случае конструкций из металла большей толщины для неразъёмных герметичных корпусов рекомендуют сварные швы, конфигурация и содержание которых зависят от метода сварки. Для пластичных металлов, например алюминия, можно применить холодную сварку, т. е. сварку давлением фланца корпуса и края крышки. В этом случае толщина стенок корпуса и крышки должна быть не менее 0,8 мм.

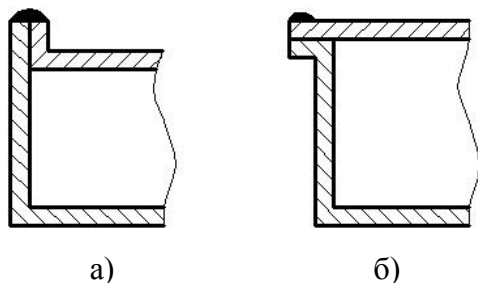


Рис. 9.2. Герметизация сваркой

Конструкции сварного шва для электродуговой и газовой сварки показаны на рис. 9.2, а, а для контактной роликовой электросварки – на рис. 9.2, б.

В том случае, когда требуются регулировка, настройка и ремонт, предлагают разъёмный корпус герметизации. Разъёмные соединения крышки и корпуса уплотняют с помощью прокладки и винтовых либо болтовых соединений. Для того чтобы обеспечить герметичность соединения,



применяют обычно для корпусов ЭС резиновые прокладки прямоугольного либо круглого сечения. Прокладка должна укладываться в канавку стенки корпуса или в канавку крышки. Исходя из требований надёжности герметизации, необходимо рассчитывать размеры прокладки, размеры канавки, количество и диаметр винтов соединения.

### 9.3. Расчёт разъёмных соединений герметизации

Целью расчёта является выбор материала и размеров прокладки, расчёт канавки под прокладку, расчёт количества и диаметра винтов (болтов) соединений.

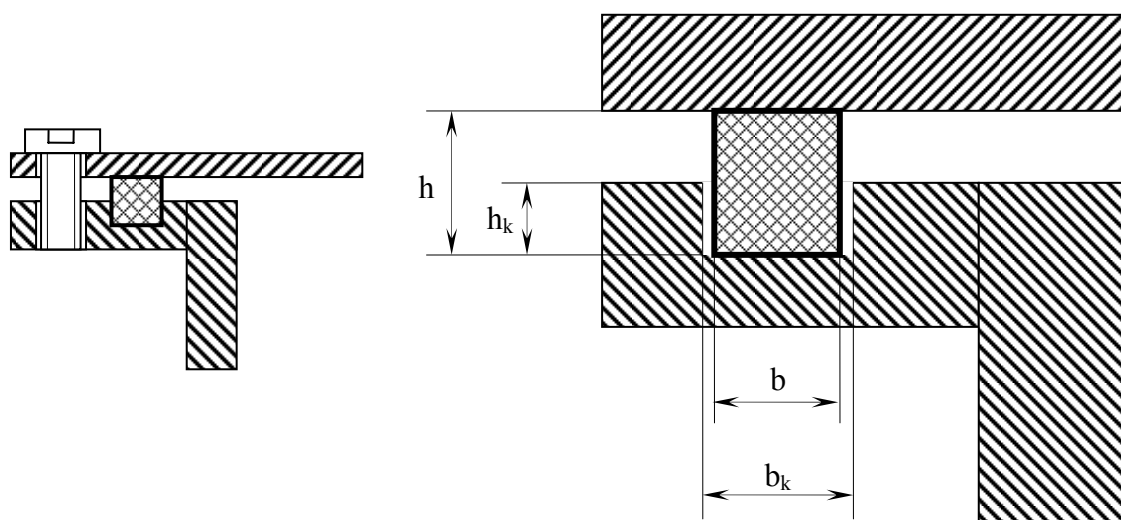


Рис. 9.3. Герметизация с помощью резиновой прокладки

Пример герметизации конструкции с помощью резиновой прокладки приведен на рис. 9.3. Материал прокладки выбираем в зависимости от условий эксплуатации и наличия агрессивной среды. Чаще всего используют резину НО-68-1, у которой диапазон рабочих температур от  $-55$  до  $+100$  °С допускает эксплуатацию на открытом воздухе, а также при наличии загрязнённости маслами, бензином, керосином, слабыми растворами кислот и щелочей. Твёрдость по ТИРу 50...70 ед.

Резина ИРП1276: диапазон рабочих температур – 70...200 °С, твёрдость по ТИРу 40...55 ед.

Оптимальным считается сжатие резиновой уплотнительной прокладки на 25 % её первоначальной высоты, т. е. относительная деформация прокладки

$$\varepsilon = \frac{h - h_1}{h} = 0,25.$$

Размеры прокладки: ширина  $b$  и высота  $h$  выбираются в зависимости от периметра соединения или (если оно кольцевое) от внутреннего диаметра кольцевой прокладки по табл. 9.1.

Указанные размеры прокладок рекомендованы для случая возможных перепадов давлений внутри и вне корпуса в 2 атм. Если перепадов давлений не предусматривается, то размеры прокладки можно уменьшить примерно до 1,5 раз.

Таблица 9.1. Рекомендованные размеры прокладки

| Внутренний диаметр прокладки<br>(периметр соединения), мм | Размеры прокладки |                 |
|---|-------------------|-----------------|
|   | ширина $b$ , мм   | Высота $h$ , мм |
| 30...50 (90...150)  | 3,0               | 3,0             |
| 50...80 (150...240)                                       | 3,5               | 3,5             |
| 80...100 (240...300)                                      | 4,0               | 4,0             |
| 100...150 (300...450)                                     | 4,5               | 4,5             |
| 150...190 (450...570)                                     | 5,0               | 5,0             |
| 190...240 (570...720)                                     | 5,5               | 5,5             |
| 240...300 (720...900)                                     | 6,0               | 6,0             |
| 300...390 (900...1200)                                    | 6,5               | 6,5             |
| 390...460 (1200...1400)                                   | 7,0               | 7,0             |
| 460...550 (1400...1700)                                   | 8,0               | 8,0             |

Размеры канавки под прокладку рассчитывают, исходя из принципа "не сжимаемости" прокладки, т. е. прокладка не изменяет свой объём при сжатии в канавке, т. е.

$$bh = b_k h_k,$$

где  $b_k$  и  $h_k$  – ширина и высота канавки.

Высоту канавки выбирают, исходя из условий оптимальности сжатия прокладки, т. е.  $h_k = 0,75h$ . В таком случае  $b_k = b \cdot h / h_k$ .

Канавку можно выполнить в корпусе или же в крышке разъёмного соединения. Диаметр винтов и количество винтов соединения выбирают, исходя из твёрдости прокладки и её размеров по следующей методике:

1) По твёрдости выбранной резины выбирают модуль сдвига резины (рис. 9.4). Например, для резины НО68 при твёрдости 50 модуль сдвига  $G$  равен  $7 \cdot 10^5$  Па.

2) По выбранному значению модуля сдвига определяем модуль продольной упругости резины  $E = 3 \cdot G$ .

3) Определяем модуль сжатия резиновой прокладки с учётом её конфигурации.  $E_{\text{пр}} = E(1 + \alpha \cdot \Phi)$ ,

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от трения прокладки с металлом корпуса:  $\alpha = 2 \cdot f$ ,  $f$  – коэффициент трения. Для контакта резина-металл  $f = 0,6$ .

$\Phi$  – коэффициент формы прокладки, представляет собой отношение площади нагружения прокладки крышкой и свободной от нагружения площади

$$\Phi = \frac{b}{2 \cdot h}.$$

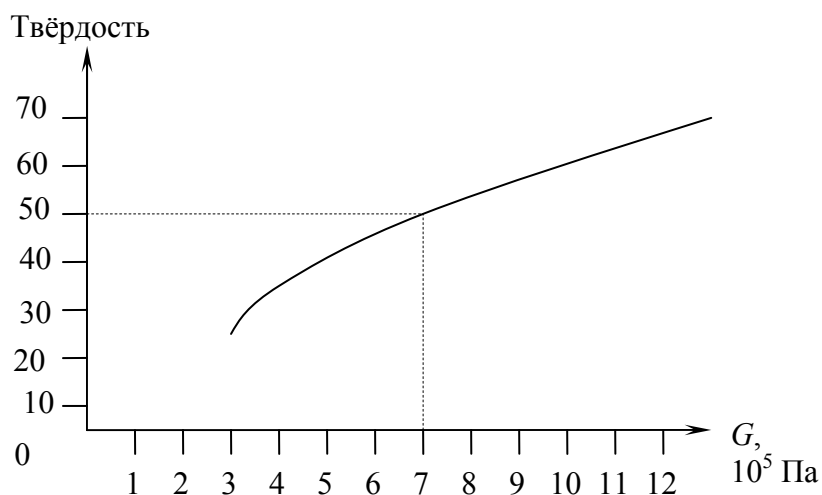


Рис. 9.4. Зависимость твердости резины от модуля сдвига

4) Определяем напряжение, возникающее в прокладке при сжатии на требуемую деформацию  $\varepsilon$ .

$$\sigma_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} \cdot \varepsilon,$$

где  $\varepsilon = 0,25$ .

5) Определяем силу сжатия прокладки винтами или болтами соединения

$$F = \sigma_{\text{пр}} \cdot S,$$

где  $S$  – площадь сжатия прокладки, т. е. контактирования с крышкой.

$$S = b \cdot \Pi,$$

где  $\Pi$  – периметр прокладки.

б) Определяем количество и диаметр винтов или болтов соединения, так чтобы напряжения стягивания винтами или болтами не превышали допустимых значений материала винта

$$\sigma = \frac{F}{n \frac{\pi d_{\text{в}}^2}{4}} = \frac{4 \cdot F}{\pi n d_{\text{в}}^2} \leq [\sigma_{\text{доп}}],$$

где  $n$  – количество предлагаемых винтов или болтов соединения,  
 $d_{\text{в}}$  – внутренний диаметр винта или болта (по канавке резьбы),  
 $\sigma_{\text{доп}}$  – допустимое напряжение на разрыв (растяжение) материала винта. Зависит от материала винта (для сталей обычно составляет от 12 до 30 кг/мм<sup>2</sup>).

Отсюда диаметр винта определится  $d_{\text{в}} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot n [\sigma_{\text{доп}}]}}$ .

Если предложенное соединение может эксплуатироваться при повышенных температурах эксплуатации, то при температурных расширениях прокладки увеличивается механическое напряжение в прокладке, а значит, увеличивается сила на винты соединения. Поэтому в этом случае необходимо подкорректировать найденные значения напряжения в прокладке  $\sigma_{\text{пр}}$  под возможные значения при верхней температуре эксплуатации ЭС (рис. 9.5).

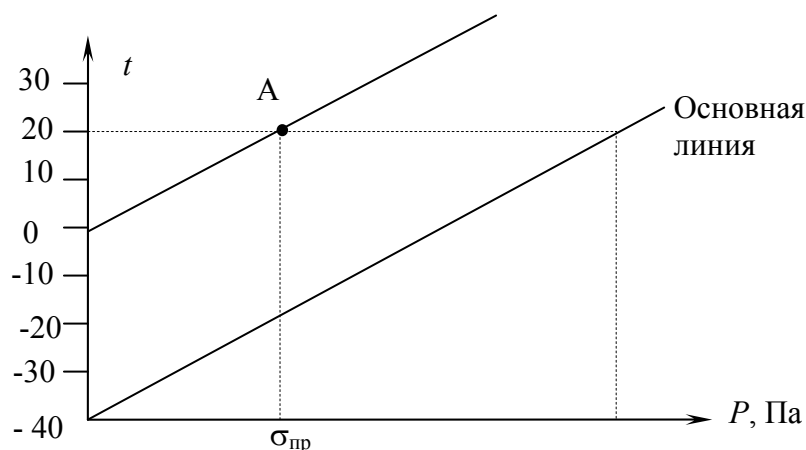


Рис. 9.5. График температурных усилий, возникающих в резине

Коррекция выполняется следующим образом. Через рассчитанную точку А для напряжения прокладки  $\sigma_{\text{пр}}$  при температуре сборки изделия (нормальной температуре) проводим линию, параллельную основной линии графика, и по этой линии определяем возможные на-

пряжения в прокладке при максимальной температуре эксплуатации. По найденному максимальному значению в прокладке рассчитываются затем сила сжатия прокладки и винты. Наружный диаметр винта рассчитываем по формуле  $d = d_v / 0,85$  и выбираем стандартный винт с метрической резьбой и диаметром не менее рассчитанного.

В настоящее время для малогабаритных конструкций микроэлектронной аппаратуры применяются герметичные соединения – паяные, но разборные при эксплуатации (рис. 9.6).

Конец проволоки, запаянный по периметру соединений, выводят наружу во внешнюю канавку корпуса и при необходимости ремонта вытаскивают проволоку, тем самым разбортовывая соединение.

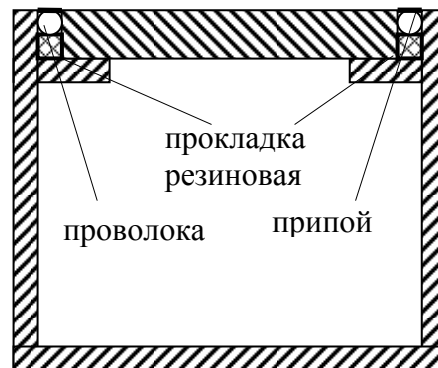


Рис. 9.6. Паяное разборное герметичное соединение

#### 9.4. Герметизация электрических соединений и подвижных элементов герметичных корпусов

В случае необходимости разъёмных электрических соединений из герметичного корпуса применяют герметичные разъёмы (типов РПС, РСГ, которые требуют уплотнения по фланцу крепления корпуса). Для уплотнения корпуса такого разъёма предлагаются утолщение стенки корпуса, канавка и уплотнительная прокладка.

Для большей надёжности со стороны электрических выводов предлагается дополнительная герметизация компаундом. В случае небольшого количества выводов из гермокорпуса неразъёмным соединением применяют проходные изоляторы (стеклянные либо керамические). Наиболее сложно выполнить герметично выходы подвижных осей и валов из герметичного корпуса.

В этом случае можно применить резиновую прокладку вокруг вала и прижимной фланец (рис. 9.7, 9.8), хотя имеют место недостатки:

1. Для того чтобы винты крепления фланца с уплотнением не разгерметизировали корпус, нужны утолщения корпуса в месте крепления фланца, которые повышают жесткость конструкции.

2. Резиновая прокладка имеет большой коэффициент трения и требует больших усилий вращения вала. Кроме этого при высоком трении прокладки быстро стираются.

3. Во время эксплуатации стареет и изнашивается материал прокладки, что приводит к уменьшению герметичности соединения.

4. Прижимной фланец сжимает прокладку на неуправляемую величину как показано на рис. 9.7, тогда как надо сжать на 25 % заданной высоты и поджимать по мере эксплуатации.

Фторопластовый сальник может прижиматься к герметизированной оси вращения с помощью пружинного кольца. Фторопластовый сальник крепится к корпусу с помощью прижимного фланца и крепёжных винтов в утолщённую стенку корпуса (рис. 9.8).

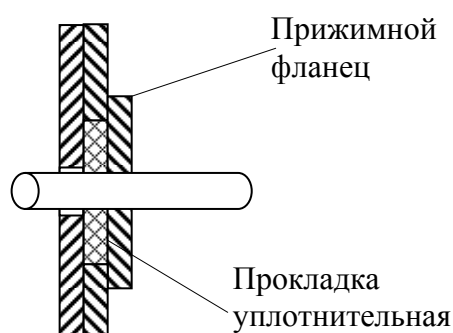


Рис. 9.7. Герметизация валов

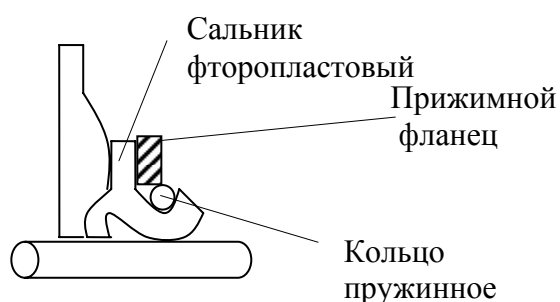


Рис. 9.8. Герметизация валов с помощью сальника

## 9.5. Основы автоматизации выбора способа влагозащиты ЭС

Задача выбора способа влагозащиты электронных средств относится к классу трудноформализуемых (так же как и задачи выбора способов охлаждения ЭС, электромагнитной защиты, виброударозащиты ЭС, которые были рассмотрены выше). Поэтому для решения этой задачи целесообразно применение методов и технологий экспертных систем.

Влагозащита ЭС может быть исполнена с помощью четырех дополняющих друг друга способов: герметизация ЭС, покрытия металлические и неметаллические неорганические (МНН покрытия), лакокрасочные покрытия (ЛКП) и пропитка и заливка ЭРЭ и конструкций ЭС, которые используют гигроскопичные материалы.

Эти способы образуют 1-й ярус И-ИЛИ-дерева (графа), состоящий из И-вершин. И-вершины соответствуют дополняющим друг друга способам виброзащиты ЭС.

Каждая из И-вершин порождает подграфы, содержащие ИЛИ-вершины, которые приводят к взаимоисключающим способам влагозащиты.

Каждая И-вершина соответствует некоторой подзадаче выбора способа влагозащиты ЭС. Кроме определения состава подзадачи (их всего 4), необходимо определить последовательность их решения, исходя из взаимосвязей между ними. Опыт конструирования ЭС приводит к рекомендации решения этих подзадач в перечисленном выше порядке. Действительно, выбор МНН-покрытия зависит от того, применялась или нет герметизация, а некоторые из МНН-покрытий используются как грунт для лакокрасочных покрытий.

Рассмотрим подробнее каждую из четырех подзадач выбора способа влагозащиты.

### ***Влагозащита герметизацией***

Граф решения подзадачи «Герметизация ЭС» достаточно прост и содержит три терминальные вершины: герметизация (не требуется, разъемная, неразъемная). Атрибутов выбора три и они принимают следующие значения:

- элементная база (корпусная, бескорпусная),
- брызговодействие (отсутствует, есть),
- ремонтпригодность (требуется, не требуется).

Для выбора способа герметизации можно воспользоваться графом решения БЗ «Кожух ЭС» (см. рис. 7.7) со следующими дополнениями, которые представлены в виде продукционного правила:

ЕСЛИ Ремонтпригодность = Требуется,  
ТО Герметизация = Разъемная,  
ИНАЧЕ Герметизация = Неразъемная.

### ***Влагозащитные металлические и неметаллические неорганические покрытия***

МНН-покрытия отличаются значительным разнообразием [9], [20]. Различные виды покрытий представлены во втором столбце табл. 9.2.

Основные атрибуты для выбора МНН-покрытий следующие:

- вид детали,
- материал детали,
- условия эксплуатации.

Значения, которые принимают эти атрибуты, также многочисленны, поэтому изобразить структуру базы знаний «Влагозащита ЭС» в виде графа решения не представляется возможным, поэтому основное содержание БЗ представим в виде двух таблиц.

В табл. 9.2 представлены основные типовые детали ЭС и наиболее часто используемые материалы для их изготовления.

Таблица 9.2. Детали и материалы деталей

| Детали   | Материалы деталей   |
|--|---|
| Лицевая и задняя панели  | Алюминий и алюминиевые сплавы, магниевые сплавы, сталь, титановые сплавы, пластмассы      |
| Кожухи   | Пластмасса, сталь, алюминий и алюминиевые сплавы  |
| Шасси, каркасы ЭС  | Сталь, алюминий и алюминиевые сплавы, магниевые сплавы, титановые сплавы, цинковые сплавы |
| Ручки  | Сталь, пластмасса   |
| Рамки ячеек  | Алюминий и алюминиевые сплавы, пластмассы, магниевые сплавы                               |
| Радиаторы  | Алюминий и алюминиевые сплавы, медь   |
| Печатные контакты разъемных соединений   | Бронза, медь  |
| Экраны электромагнитные  | Сталь, алюминий, медь, латунь, пластмасса (с экранирующим покрытием)                      |
| Волноводы, резонаторы  | Сталь, медные сплавы  |
| Печатные платы   | Стеклотекстолиты, лавсаны, полиимиды, гетинаксы   |
| Каркасы катушек индуктивностей, дросселей, катушек трансформаторов, линий задержек на катушках | Пластмассы, керамика  |
| Коммутационные платы микросборок   | Керамика, поликор   |

В четвертом столбце табл. 9.3 указаны также дополнительные свойства покрытий: декоративная отделка, улучшение электропроводности и др.



Таблица 9.3. Влагозащитные металлические и неметаллические неорганические покрытия

| Материал детали                        | Вид покрытия   | Группы условий эксплуатации по ГОСТ 9.303-84 | Дополнительные свойства   |
|--|----------------|--|---|
| Сталь коррозионностойкая (нержавеющая) | Без покрытия   | 1 – 8  | Кислотостойкая, стойкая в атмосфере агрессивных промышленных газов    |
| Углеродистая сталь                     | Цинковое       | 2 – 8  | –   |
|  | Кадмиевое      | 4, 6 – 8                                     | Стойкость в морской воде  |
|  | Никелевое      | 1 – 4  | Декоративная отделка  |
|  | Хромовое       | 1 – 7  | Увеличение твердости, декоративная отделка                            |
|  | Серебряное     | 1 – 8  | Улучшение электропроводности  |
|  | Фосфатное      | 1 – 8  | Обеспечение электроизолирующих свойств, декоративная отделка          |
|  | Пассивное      | 2 – 6  | –   |
| Алюминий и алюминиевые сплавы          | Без покрытия   | 1  | –   |
|  | Кадмиевое      | 2 – 4  | –   |
|  | Никелевое      | 1 – 3  | Улучшение электропроводности, нестойкость в морской атмосфере         |
|  | Хромовое       | 1 – 3  | Увеличение твердости  |
|  | Серебряное     | 2,5  | Улучшение электропроводности  |
|  | Окисное        | 1 – 8  | Нестойкость в морской атмосфере, придание электроизоляционных свойств |
|  | Анодно-окисное | 5 – 6  | Придание электроизоляционных свойств                                  |
|  | Пассивное      | 1 – 8  | –   |
| Цинковые сплавы                        | Фосфатное      | 1 – 4  | –   |
|  | Хромовое       | 1 – 3  | Увеличение твердости, декоративная отделка                            |
|  | Никелевое      | 1 – 6  |   |
| Магний и магниевые сплавы              | Окисное        | 1 – 6  | Декоративная отделка, неустойчивые защитные свойства                  |

| Материал детали                        | Вид покрытия | Группы условий эксплуатации по ГОСТ 9.303-84 | Дополнительные свойства  |
|--|--------------|--|--|
| Титан и титановые сплавы               | Без покрытия | 1 – 8  | –  |
|  | Никелевое    | 1 – 8  | Улучшение электропроводности   |
|  | Серебряное   | 1 – 8  |  |
|  | Окисное      | 1 – 8  | Придание электроизоляционных свойств   |
| Медь и медные сплавы                   | Пассивное    | 1 – 8  | –  |
|  | Цинковое     | 2 – 8  | Защита от коррозии при контакте с деталями из алюминиевых сплавов            |
|  | Кадмиевое    | 4, 6 – 8                                     |  |
|  | Никелевое    | 1 – 8  | Придание поверхностной твердости   |
|  | Хромовое     |  |  |
|  | Серебряное   | 1 – 8  | Улучшение электропроводности   |
|  | Золотое      | 1 – 8  | Снижение переходного сопротивления, повышение износостойкости                |
|  | Родиевое     | 1 – 8  |  |
|  | Окисное      | 1 – 6  | Декоративная отделка   |
| Пластмасса, керамика, ситаллы, ферриты | Никелевое    | В соответствии с ТУ на изделие               | Обеспечение электрической проводимости и экранирования, декоративная отделка |
|  | Кадмиевое    |  |  |
|  | Серебряное   |  |  |
|  | Палладиевое  |  |  |
|  | Золотое      |  |  |
|  | Медное       |  |  |
|  | Нихромовое   |  |  |

Условия эксплуатации в соответствии с ГОСТ 9.303-84 [9(9.1)] делятся на 8 групп:

- группа 1 – легкие условия эксплуатации (Л);
- группы 2, 3, 4 – средней жесткости (С);
- группы 5, 6 – жесткие условия (Ж);
- группы 7, 8 – особо жесткие (ОЖ).

Для уточнения выбора МНН-покрытия следует также воспользоваться следующим кратким описанием свойств МНН-покрытий.

## ***Некоторые свойства МНН-покрытий***

### *Свойства цинкового покрытия*

Покрытие характеризуется хорошим сцеплением с основным металлом, хорошо выдерживает гибку, развальцовку, не выдерживает запрессовку. Не пригодно для изделий, работающих в условиях трения. Термическая обработка при температуре 180 – 200 °С повышает коррозионную стойкость покрытия. В среде, насыщенной промышленными газами, цинковое покрытие более стойко, чем кадмиевое. Для повышения защитных свойств цинкового покрытия применяют дополнительную окраску их лаками и эмалями. Во влажном воздухе, в том числе насыщенном морскими испарениями, появление на поверхности окислов цинка не снижает защитных свойств покрытия.

### *Свойства кадмиевого покрытия*

Покрытие характеризуется прочным сцеплением с основным металлом, высокой пластичностью и эластичностью при развальцовке, штамповке, запрессовке, свинчивании, протяжке. Устойчиво в среде морских испарений, туманов, морской воды и щелочных растворов. Неустойчиво в атмосфере, загрязненной сернистыми газами, продуктами испарения органических веществ и в присутствии деревянных деталей, пропитанных олифой или растительными маслами, а также в закрытых полостях. Кадмиевое покрытие не является износоустойчивым. Для повышения защитных свойств применяют окраску лаками и эмалями. По причине дефицитности кадмия покрытие применяют только в случае, когда применение цинкового покрытия недопустимо.

### *Свойства никелевого покрытия*

Покрытие коррозионно-устойчивое при температуре от –60 до +650° С и при повышенной влажности. Покрытие характеризуется хорошим сцеплением с основным металлом, высокими антифрикционными свойствами, износостойкостью, способностью осаждаться равномерным слоем на деталях сложной конфигурации. Ухудшает механические свойства сталей.

### *Свойства хромового покрытия*

Покрытие обеспечивает защиту от коррозии, повышает поверхностную твердость и износостойкость, улучшает внешний вид. Покрытие характеризуется высокой химической стойкостью, термостойкостью, склонностью к пассивированию на воздухе.

Покрытие неустойчиво к воздействию атмосферы, загрязненной галогеноводородными соединениями, хорошо выдерживает равно-

мерно распределенную нагрузку, но легко разрушается под действием сосредоточенных ударных нагрузок, снижает усталостную прочность стальных деталей.

#### *Свойства покрытия серебром и его сплавами*

Покрытие имеет высокую электропроводность. Для сохранения стабильных электрических параметров серебряного покрытия применяется палладирование и родирование. Эти покрытия увеличивают износостойкость и твердость серебра.

Детали, находящиеся в постоянном соприкосновении с материалами, содержащими серу, покрывать серебром и его сплавами не допускается.

#### *Свойства покрытия из золота и его сплавов*

Золотое покрытие характеризуется высокой химической стойкостью (не окисляется, не тускнеет и сохраняет постоянство электрических параметров при воздействии атмосферы и агрессивных сред), высокой электро- и теплопроводностью, хорошей способностью к сварке.

#### *Свойства полладиевого покрытия*

Покрытие характеризуется стойкостью против атмосферной коррозии, высокой электрической проводимостью и износостойкостью. Переходное электрическое сопротивление стабильно во времени.

#### *Свойства родиевого покрытия*

Покрытие характеризуется высокой химической стойкостью по отношению к кислотам и щелочам, износостойкостью, высокой отражательной способностью.

#### *Свойства окисных покрытий, наносимых способом анодного окисления*

Покрытие характеризуется хорошим сцеплением с основным металлом, хорошими защитными свойствами, высоким электрическим сопротивлением, хрупкостью. Электрическая прочность покрытия увеличивается при пропитке лаками, обеспечивающими влагозащиту. Пропитка лаками надежно защищает изделия от коррозии.

#### *Свойства окисных покрытий, наносимых химическим способом*

Защитные свойства покрытия невысокие и повышаются при обработке покрытий лаками и гидрофобизирующими жидкостями. Подвержены быстрому истиранию. Нержавеющие и высоколегированные стали окислению не подвергаются. Детали, подвергающиеся пайке и имеющие паяные швы, окислять не рекомендуется.

### *Свойства фосфатных покрытий*

Покрытие хрупко, неустойчиво против трения, пористо, обладает высокой адсорбционной способностью, вследствие чего является очень хорошим грунтом под лакокрасочные покрытия. Обладает высоким электрическим сопротивлением. Не поддается пайке и сварке. Защитные свойства фосфатных покрытий по стали повышаются при обработке маслами, лаками и эмалями.

*Свойства пассивного покрытия (на легированных сталях, меди и ее сплавах)*

Пассивирование деталей производится с целью повышения их коррозионной стойкости. Пассивирование деталей из меди и ее сплавов применяется в том случае, если другое покрытие недопустимо. С целью повышения защитных свойств пассивного покрытия применяется нанесение на него лакокрасочных материалов.

### ***Влагозащитные лакокрасочные покрытия***

Существует значительное разнообразие вариантов ЛКП, которые представлены в первом столбце табл. 9.4. Там наряду с лаками используются следующие покрытия:

- КЭВ – композиция эпоксидная влагозащитная «КЭВ»;
- ВЗПК «Поливоск» – влагозащитная полимерная композиция «Поливоск»;
- ППК – полипараксилилен;
- ПХПК – полихлорпараксилилен;
- ГФЖ – жидкость гидрофобизирующая.

Добавление символов (+Al) в обозначениях лаков означает добавление алюминиевой пудры в лак.

В качестве атрибутов выбора ЛКП примем следующие:

- объекты влагозащиты;
- условия эксплуатации;
- диапазон температур (уточняющий параметр условий эксплуатации).

Значительное разнообразие ЛКП и значений атрибутов выбора [7(9.3), 31(9.6)] не позволяет представить структуру базы знаний в виде графа решений. Поэтому содержание БЗ «ЛКП» представим в виде табл. 9.4.

Таблица 9.4. Влагозащитные лакокрасочные покрытия

| ЛКП             | Объекты<br>влагозащиты | Условия эксплуатации |      |      |     |     |     | Диапазон<br>температур, °С   | Дополнительные<br>сведения |
|-----------------|------------------------|----------------------|------|------|-----|-----|-----|--|----------------------------|
|                 |                        | В2                   | Т2   | ХЛ2  | 5.1 | 9.1 | –   |  |                            |
| Лак ЭП-9114     |                        | О2                   | УХЛ2 | У2   | 9.1 | –   | 6   | Устойчивы к периодическому воздействию влаги, машинного масла, бензина |                            |
|                 |                        | ОМ2                  |      |      |     |     |     |  |                            |
|                 |                        | В2                   | ХЛ2  | УХЛ2 | У2  | 9.1 | –   |  |                            |
| Лак УР-231 (л)  |                        | О2                   | Т2   | УХЛ2 | У2  | 9.1 | 7.3 | Устойчивы к периодическому воздействию влаги, машинного масла, бензина |                            |
|                 |                        | ОМ2                  |      |      |     |     | 7.4 |  |                            |
|                 |                        | В2                   | ХЛ2  | УХЛ2 | У2  | 9.1 | –   |  |                            |
| Лак ЭП-730      | ЭМ                     | О2                   | Т2   | УХЛ2 | У2  | 9.1 | 7.3 | Устойчивы к периодическому воздействию влаги, машинного масла, бензина |                            |
|                 |                        | ОМ2                  |      |      |     |     | 7.4 |  |                            |
|                 |                        | В2                   | ХЛ2  | УХЛ2 | У2  | 9.1 | –   |  |                            |
| КЭВ             |                        | –                    | Т2   | УХЛ2 | У2  | 9.1 | –   | –  |                            |
|                 |                        |                      |      |      |     |     |     |  |                            |
|                 |                        |                      |      |      |     |     |     |  |                            |
| ВЗПС «Поливоск» |                        | –                    | Т2   | УХЛ2 | У2  | 9.5 | –   | Устойчиво к воздействию влаги  |                            |
|                 |                        |                      |      |      |     |     |     |  |                            |
|                 |                        |                      |      |      |     |     |     |  |                            |
| ПШК             | ЭМ-П                   | В2                   | ХЛ2  | УХЛ2 | У2  | 9.1 | –   | Высокая сплошность и однородность в узких зазорах и кромках            |                            |
|                 |                        | О2                   | УХЛ2 | У2   | 9.1 | –   |     |  |                            |
|                 |                        | ОМ2                  |      |      |     |     |     |  |                            |



В табл. 9.4 для обозначения объектов влагозащиты использованы следующие сокращения:

- ЭМ – электронный модуль с объемным или печатным монтажом;
- ЭМ-П – электронный модуль с печатным или поверхностным монтажом.

В этой таблице также требует пояснения атрибут «Условия эксплуатации» [8(9.4)]. Указанные в третьем столбце таблицы условия эксплуатации содержат наименование макроклиматических районов и категорий размещения электронных средств.

Связь групп условий эксплуатации, определенных ГОСТом [9(9.1)] и приведенных в табл. 9.3, с макроклиматическими районами и категориями размещения приведены в справочном приложении 7 к ОСТ [20(9.2)].

В свою очередь, ГОСТ 15150-69 [4(9.5)] устанавливает 7 макроклиматических районов и 5 категорий размещения.

Макроклиматические районы:

- У – умеренный климат;
- ХЛ – холодный климат;
- УХЛ – умеренно-холодный;
- Т, ТВ, ТС – тропический (сухой и влажный), тропический влажный и тропический сухой;
- М, ТМ, ОМ – морской умеренно-холодный, тропический морской, на судах с неограниченным районом плавания;
- О – любой район на поверхности Земли, кроме морей и озер;
- В – любой район на поверхности Земли.

Категории размещения:

- 1 – эксплуатация на открытом воздухе;
- 2 – помещения типа палаток, кузовов, ангаров, под навесами;
- 3 – закрытые помещения с естественной вентиляцией;
- 4 – помещения с кондиционированием воздуха (отапливаемые);
- 5 – помещения неотапливаемые и невентилируемые.

И, наконец, для лакокрасочных покрытий, кроме климатических факторов (атмосферостойкие группы покрытий), ГОСТ 9.032-74 устанавливает с 4-й по 9-ю группы покрытий, условия эксплуатации для некоторых из них следующие:

- 4 – пресная и морская вода и ее пары (4/1 – только пресная);
- 5/1 – рентгеновские и другие виды излучений;
- 6 – маслобензостойкие;
- 7 – химически стойкие (7/1 – агрессивные газы, пары; 7/3 – растворы щелочей и основных солей; 7/4 – растворы нейтральных солей);



- 8 – термостойкие (температура выше 60 °С);
- 9/1 – электроизоляционные.

### ***Влагозащита пропиткой и заливкой***

Пропитка жидкими затвердевающими диэлектриками применяется в основном для точных изделий (катушки дросселей, трансформаторов и т. д.). Влагозащиту заливкой применяют для неремонтируемых узлов и модулей ЭС. Заливка может быть в герметичном неразъемном корпусе или затвердевающими компаундами без корпуса. Применяемые для заливки без корпуса компаунды могут быть эластичными вибродемпфирующими. Например, для заливки модулей на печатных платах широко применяют эластичные легкие пористые материалы на основе пенополиуретанов, которые обеспечивают герметичность конструкции и уменьшают резонансные амплитуды виброперемещения в десятки раз (см. разд. 8).

### **Контрольные вопросы**

1. Какие виды воздействия влаги на различные ЭС вы знаете? К каким последствиям приводит воздействие влаги?
2. Назовите основные методы влагозащиты элементов конструкций ЭС в зависимости от назначения и материалов элементов?
3. Разъемная и неразъемная герметизация ЭС, особенности исполнения корпусов и соединений.
4. Каким образом выбираются материалы и размеры уплотнительных прокладок, канавок для прокладок, а также количество винтов для разъемных соединений гермокорпусов.
5. Каким образом происходит герметизация неразъемных корпусов? От чего зависит толщина стенки корпуса?
6. Каким образом обеспечивают герметизацию корпусов с подвижными элементами и электрическими проводниками, проходящими через стенку корпуса?
7. Какими методами решается задача автоматизации выбора способа влагозащиты ЭС?
8. Основные свойства влагозащитных металлических покрытий.
9. Основные свойства влагозащитных неметаллических неорганических покрытий.
10. Основные свойства влагозащитных лакокрасочных покрытий.

## **10. ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ЭС К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ И ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЯМ**

### **10.1. Источники и приёмники помех в ЭС**

В электронных средствах имеют место источники помех и чувствительные к помехе элементы и узлы (рецепторы). Электромагнитная совместимость предполагает совместную работу источников и приёмников помех, когда уровень помехи не превышает допустимых норм для приёмника помех.

Источники помех разделяют на источники естественного и искусственного происхождения.

**Основные источники естественного происхождения:**

1. Различные природные явления (атмосферные шумы, грозовые разряды и пр.);
2. Электростатический разряд (ЭСР);
3. Мощный электромагнитный импульс (ЭМИ), к примеру, от взрыва ядерного заряда и др.

**Источники электромагнитных помех искусственного происхождения:**

1. Мощные передатчики: радиостанции, ТВ-станции, радиолокация, навигация, (например, навигация аэропортов, военного и гражданского флота) и др.
2. Радиослужбы в условиях ограниченного объёма – корабельные радиослужбы, ВМФ – на одном корабле несколько сот радиостанций.
3. Мобильная связь.
4. Генераторы, усилители и им подобные узлы большой мощности, выходные каскады устройств большой мощности.
5. Все генераторы ВЧ и провода с ВЧ током. На высокой частоте у генераторов и проводов ВЧ тока возникает электромагнитная волна, которая слабо затухает на расстоянии.
6. Все генераторы и провода релаксационных токов. Всякий релаксационный сигнал может быть разложен в ряд гармонических синусоидальных составляющих, при этом основная энергия электромагнитного излучения сосредоточена в диапазоне частот, ширина которого обратно пропорциональна длительности импульса (случай пря-

моугольного импульса). Следовательно, чем короче импульс, тем шире спектр частот помехи.

7. Все устройства, работа которых связана с разрывом электрических цепей под током (реле, контакторы, тумблеры, переключатели), а также узлы, блоки и элементы, работающие в ключевом режиме – возникают новые спектральные составляющие, расширяющие спектр помех.

8. Все устройства, работа которых связана с искрением на контактах (электродвигатели с коллекторами и щетками питания, контакторы, выключатели).

9. Все высоковольтные устройства, на острых гранях которых может быть разряд или стекание зарядов.

10. Радиоэлектронные устройства с большой напряжённостью электрического поля даже на низких частотах, например, источники питания с большим напряжением (ЛЭП и электропередача в зданиях).

11. Все электрические устройства с большой напряжённостью магнитного поля даже на НЧ (источники питания с большими токами). Изделия, содержащие индуктивности, трансформаторы, дроссели и т. д.

Возможны различные расстояния от источника до рецептора помех, начиная от сотен километров (грозовой разряд, мощный передатчик) и заканчивая долями метра, если рассматривать пространство внутри аппарата.

### ***Рецепторы (приемники помех)***

Рецептором может выступать практически любой элемент конструкции, начиная от корпуса изделия и заканчивая выводами микросхемы, которые обладают хотя бы минимальным антенным эффектом.

Наиболее чувствительными к помехе устройствами являются:

1. Все усилители ВЧ, все контуры ВЧ и ВЧ дроссели.
2. Входные цепи усилителей НЧ.

Рецепторы могут различаться по их чувствительности к воздействию различных полей. В наиболее общей модели электромагнитной совместимости (рис. 10.1) имеется источник помех, рецептор и некоторый процесс – процесс переноса электромагнитных волн от источника к рецептору. Назовём этот процесс ***эмиссией***.



Рис. 10.1. Перенос электромагнитных волн от источника к рецептору

### Характеристики источников помех

Всё многообразие источников может быть сведено к двум основным типам (рис 10.2).

Источники с **высоким волновым сопротивлением**. Для них эк-

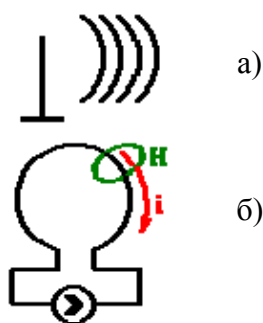


Рис. 10.2. Источники помех

вивалентная схема или модель может быть представлена в виде штыря (антенна-штырь) (рис 10.2, а). В окрестностях этого штыря формируются относительно интенсивное электрическое поле (ЭП), и слабое магнитное поле (МП). Как мы помним,  $Z = U_{\text{п}}/I_{\text{п}}$ . Поскольку электрическое поле вызывает напряжение, а магнитное – вызывает ток, получается, что большое ЭП и малое МП обеспечивают высокое волновое сопротивление  $Z$  ( $Z = E/H$ ).

В качестве штыря может рассматриваться любой ненагруженный проводник, на который подается электрический потенциал. Например, проводник, идущий к контрольной точке, либо проводник, подходящий к разомкнутым контактам выключателя, реле, к розетке, в которую не включена нагрузка и т. д.

Источники помех, модель которых может быть представлена в виде токовой петли (рис 10.2, б). При этом возникают интенсивное магнитное поле и слабое электрическое. Эти источники имеют **малое волновое сопротивление**.

В качестве токовой петли рассматриваются любые проводники, по которым протекает электрический ток.

Полученные относительные значения  $Z$  действительны для области, которая находится в непосредственной близости от излучателя. На значительных расстояниях основная составляющая поля та, которая имеет большее значение, убывает быстрее дополнительной составляющей. И в конце концов волновое сопротивление  $Z$  становится равным 377 Ом, то есть волновому сопротивлению свободного пространства.

Для первого типа источников основная составляющая – электрическая – убывает пропорционально  $1/r^3$ . Дополнительная – магнитная – пропорционально  $1/r^2$ . Для источников второго типа ситуация обратная. Магнитная составляющая убывает пропорционально  $1/r^3$ , а электрическая – пропорционально  $1/r^2$ .

Можно выделить три зоны действия источников (рис. 10.3).

1. Ближняя зона. Здесь преимущественно действует механизм индукции с достаточно чётким разделением на магнитную и электрическую составляющие.

2. Переходная зона – зона формирования плоской электромагнитной волны.

3. Дальняя зона – зона действия плоской электромагнитной волны (Т-волны).

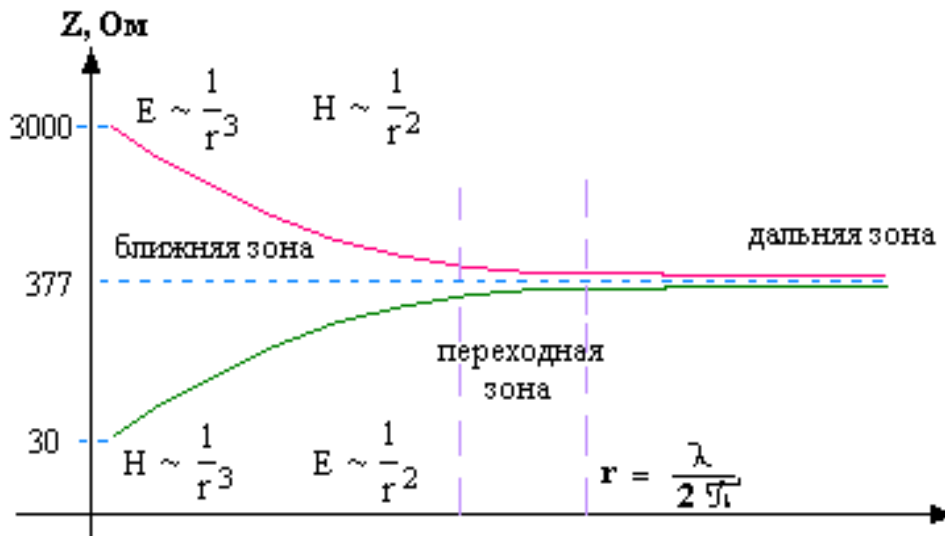


Рис. 10.3. Три зоны действия источников

Таким образом, при обеспечении ЭМС необходимо разделять задачи локализации электрического, магнитного и электромагнитного полей.

От источника помех к приёмнику помех паразитная наводка может передаваться:

- через электрическое поле,
- магнитное поле,
- электромагнитное поле,
- общие цепи источника и приёмника помех, например провода питания.

Для электромагнитной совместимости источников и приёмников помех предлагается:

- 1) пространственное разнесение источников и приемников помех,
- 2) экранирование источников и приёмников помех,
- 3) фильтрация напряжений помехи в общих проводах источников и приёмников.

## 10.2. Экранирование электрического поля. Электростатические экраны

Для защиты от сильного электрического поля при ограниченных расстояниях между источником и приемником применяют электростатическое экранирование.

Пусть,  $A$  – источник сильного электрического поля напряжения  $E$ ,  $B$  – приёмник помех с ёмкостью  $C_B$  на корпус (рис. 10.4).

Между источником и приёмником существует паразитная ёмкость. На приёмнике помехи  $B$  имеет место напряжение помехи.

$$U_B = \frac{E}{\frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пар}}} + \frac{1}{\omega \cdot C_B}} \frac{1}{\omega \cdot C_B} = E \frac{C_{\text{пар}}}{C_{\text{пар}} + C_B}.$$

Напряжение помехи будет тем больше, чем ближе источник и приёмник помех, чем больше ёмкость  $C_{\text{пар}}$ .

Поставим между источником и приёмником металлическую перегородку – экран (рис. 10.5).

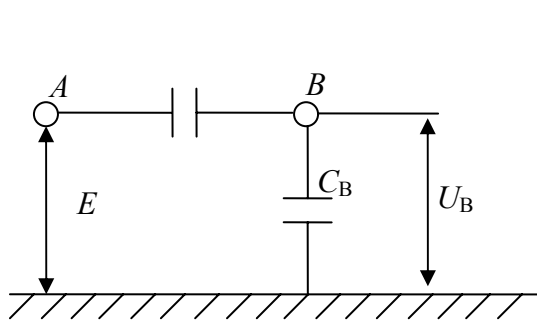


Рис. 10.4. Источник и приемник помех

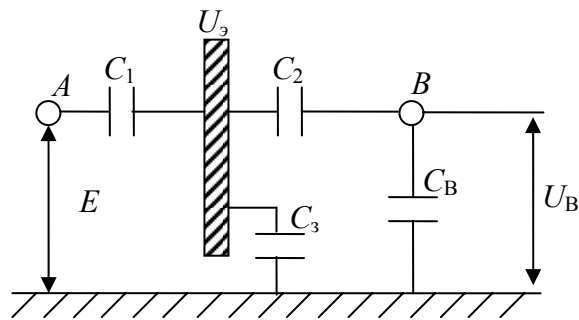


Рис. 10.5. Использование экрана для защиты от помех

Так как электростатический экран имеет ёмкости  $C_1$  и  $C_2$  относительно источника и приёмника, то на экране появляется напряжение помехи

$$U_3 = E \frac{C_1}{C_1 + C_3},$$

где  $C_3$  – ёмкость экрана относительно корпуса.

В таком случае на приёмнике помех имеем напряжение

$$U_B = U_3 \frac{C_2}{C_2 + C_B} = E \frac{C_1 \cdot C_2}{(C_1 + C_3)(C_2 + C_B)}.$$

Если ёмкость экрана на корпусе  $C_3$  очень малая, то напряжение на экране  $U_3$  примерно равно  $E$ . Следовательно, источник помех оказался на экране, т. е. приближен к приёмнику помех, т. е. стало хуже, чем было без экрана.

Для того чтобы напряжение на экране приближалось к нулю, необходимо увеличивать ёмкость экрана  $C_3$  до бесконечно большой, т. е. сопротивление экрана на корпус необходимо сделать бесконечно малым.

Следовательно, к электростатическому экрану предъявляются следующие требования:

1. Электростатический экран представляет собой перегородку между источником и приёмником помех.

Перегородка должна выполняться из металла с малым удельным сопротивлением (медь, алюминий). Перегородка может быть в виде металлического листа или металлической сетки. Экран не должен содержать щелей, отверстий, мест стыка и тому подобных неоднородностей, ориентировка которых препятствует протеканию тока в цепях заземления. Если необходимо выполнить отверстия или жалюзи, например, для охлаждения, то они должны быть расположены вдоль линий токов.

2. Электростатический экран должен иметь заземление, т. е. соединение на корпус прибора. Его сопротивление должно быть минимальной величины, а поэтому основные способы выполнения заземления – пайка или сварка. При необходимости обеспечения разъёмного соединения заземление лучше выполнять не отдельным проводом, а усиком или отбортовкой самого экрана.

Существенную проблему представляет выполнение экрана для аппаратуры в пластмассовых корпусах (например мониторы компьютеров). Повышение эффективности экранирования в этом случае достигается применением композиционных материалов (пластмасса с металлическим наполнителем) и нанесением поверхностных слоёв металла (напыление металлов, нанесение специальной проводящей краски, оклейка корпуса фольгой и т. п.).

### **10.3. Экранирование магнитного поля.**

#### **Магнитные экраны**

Принципы экранирования магнитного поля и конструкции магнитного экрана различны в зависимости от частоты магнитного поля.

Различают экраны низкочастотных магнитных полей (рис. 10.6) и высокочастотных магнитных полей (рис. 10.7).

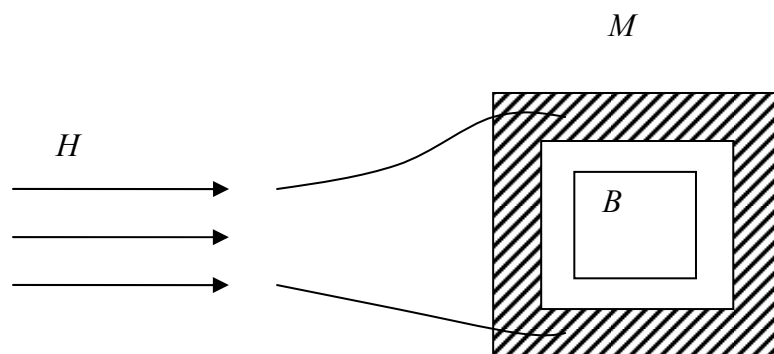


Рис. 10.6. Принцип шунтирования низкочастотного магнитного поля экраном

Для экранирования НЧ магнитного поля применяют принцип шунтирования магнитного поля около приёмника  $B$  стенками экрана с высокой магнитной проницаемостью (см. рис. 10.6).

Следовательно, НЧ магнитный экран должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Экран должен иметь замкнутую конфигурацию у экранируемого объекта для силовых линий магнитного поля  $H$ .
2. Экран должен выполняться из материала с высокой магнитной проницаемостью  $\mu$ , т. е. из ферромагнитных материалов (сталь, электротехническая сталь).

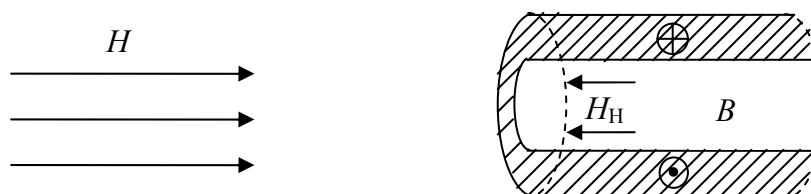


Рис. 10.7. Принцип вытеснения ВЧ магнитного поля

Магнитные экраны на ВЧ выполняют на принципе вытеснения паразитного магнитного поля около объекта  $B$  магнитным полем от наведённых токов в экране.

Для того чтобы в экране наводились токи, создающие противоположное магнитное поле  $H_n$ :

- экран должен иметь замкнутую конфигурацию конструкции в направлении, перпендикулярном направлению напряжённости  $H$ ;



– экран должен выполняться из металлов, в которых может наводиться ток.

Качество экранирования зависит от толщины экрана, удельного сопротивления, магнитной проницаемости экрана, от частоты экранируемого поля.

Рассмотрим случай экранирования  $LC$ -контура (рис. 10.8). Магнитный экран катушки индуктивности может быть круглого или прямоугольного сечения в направлении, перпендикулярном оси катушки. В стенках экрана от электромагнитного поля катушки наводятся токи, которые распределены по сечению экрана неравномерно. Максимальное значение тока имеет на поверхности экрана, ближайшей к источнику помех. Чем больше толщина экрана, тем меньше значение тока на другой от источника помех поверхности экрана. В теории экранирования существует понятие эквивалентной  $x_0$  глубины проникновения тока в экран.

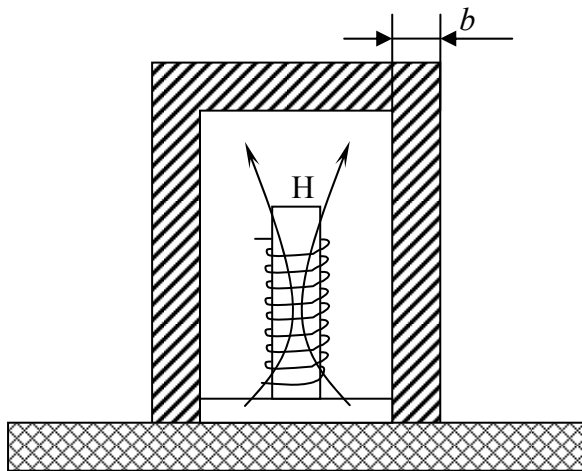


Рис. 10.8. Пример экранирования катушки индуктивности

На этой глубине в сечении экрана величина тока уменьшается на поверхности от максимального в  $e$  раз.

Эквивалентная глубина  $x_0$  проникновения тока зависит от удельного сопротивления материала экрана  $\rho$ , магнитной проницаемости материала экрана  $\mu$ , частоты поля  $f$ :

$$x_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \pi \cdot f}}$$

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.}$$

Если необходимо ослабить поле в  $N$  раз, то следует сделать экран толщиной  $b$ , большей, чем  $x_0$  в соответствии с формулой

$$b = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \pi \cdot f}} \ln N.$$

При проектировании экрана необходимо выполнить конструкцию малой толщины и массы при условии обеспечения заданной степень

ослабления  $N$ . Для этого можно выбирать экран малого удельного сопротивления (медь, латунь, алюминий) или большой магнитной проницаемости (сталь). Выбор зависит от частоты магнитного поля. При проектировании экранов на высоких частотах применяются экраны из материалов низкого удельного сопротивления, так как на высоких частотах магнитная проницаемость стали заметно уменьшается. При экранировании на низких частотах выполняют экраны из материалов с высокой магнитной проницаемостью (сталь, электротехническая сталь).

Рассчитанное по формуле значение толщины  $b$  стенки экрана обеспечивает предполагаемую эффективность с запасом, так как в формуле не учитывается отраженная от стенок экрана часть энергии, которая зависит от соотношения размеров стенок с длиной волны поля.

#### **10.4. Электромагнитные экраны. Особенности конструкции**

Электромагнитный экран должен обеспечить ослабление напряжённости магнитного и электрического полей, следовательно, должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Конструкция экрана должна быть замкнута в направлении, перпендикулярном напряжённости магнитного поля.
2. Конструкция экрана должна быть заземлённой.
3. Экран выполняется из электропроводных материалов малого удельного сопротивления  $\rho$  или высокой магнитной проницаемости  $\mu$  в зависимости от частоты поля.

Толщина экрана зависит от частоты экранируемого поля. Чем больше частота, тем тоньше будет экран.

Медный экран ослабит поле в 100 раз на частоте  $f = 10^5$  Гц при толщине экрана  $b = 0,98$  мм, а на частоте  $f = 10^8$  Гц при  $b = 0,038$  мм.

Можно видеть, что во всём ВЧ диапазоне медный экран до 1 мм обеспечивает надёжное экранирование. В СВЧ диапазоне эффективное экранирование обеспечивают экраны с  $b = 35$  мкм, т. е. роль экранирующей поверхности может исполнять фольга платы.

В этом диапазоне экран можно выполнить даже с пластмассовым корпусом с осаждением слоя меди на стенках корпуса.

### ***Особенности конструирования экранов катушек индуктивности и контуров***

Экран определяет дополнительные потери энергии, а значит, уменьшает добротность катушки. Уменьшение добротности приводит к расширению полосы пропускания, а значит, к ухудшению избирательности.

При экранировании катушки индуктивности уменьшается значение её индуктивности. Уменьшить эти отрицательные влияния можно увеличением размеров экрана. Оптимальной считается такая конструкция, когда стенки экрана отстоят от обмотки катушки на половину диаметра катушки.

В таком случае диаметр экрана равен двум диаметрам катушки. При этом индуктивность уменьшается на 17...18 %.

Для подстройки контура применяют подстроечный (ферритовый) сердечник. Значит, в конструкции экрана должны предлагаться отверстия для доступа к ферритовым сердечникам сверху, снизу или и сверху, и снизу.

Электромагнитный экран должен запаиваться на плату. Это можно сделать с помощью усика стенки экрана, который через отверстие в плате запаивается на контактную площадку печатного проводника цепи корпуса.

Для алюминиевых экранов может предлагаться биметаллический лепесток, выполненный из алюминия, плакированного медью. Он приваривается контактной сваркой к экрану вместо усика (алюминий на алюминий) и по слою меди запаивается на контактную площадку проводника корпуса.

### ***Некоторые особенности проектирования электромагнитных экранов***

В электромагнитных экранах часто бывают прорезы, отверстия, которые могут ухудшить качество экранирования.

Прорезы в конструкциях могут выполняться в качестве перфорации для охлаждения и как конструктивные при соединениях элементов экранирования (рис. 10.9).

Пример конструктивной прорези в месте стыка экрана с печатной платой представлен на рис. 10.10.

На рис. 10.10,*a* экран катушки индуктивности имеет прорезь круглой формы на стыке экрана с печатной платой, которая допусти-

ма с точки зрения качества экранирования, так как не допускает прерывания линии наведенного тока в экране.

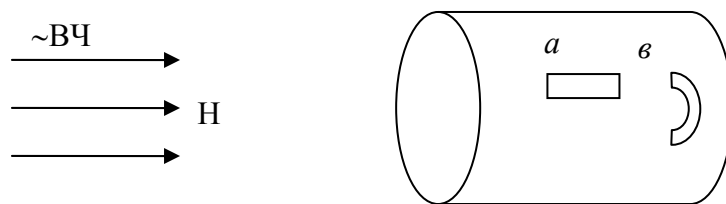


Рис. 10.9. Примеры прямоугольных прорезей *a* и *б* в экране

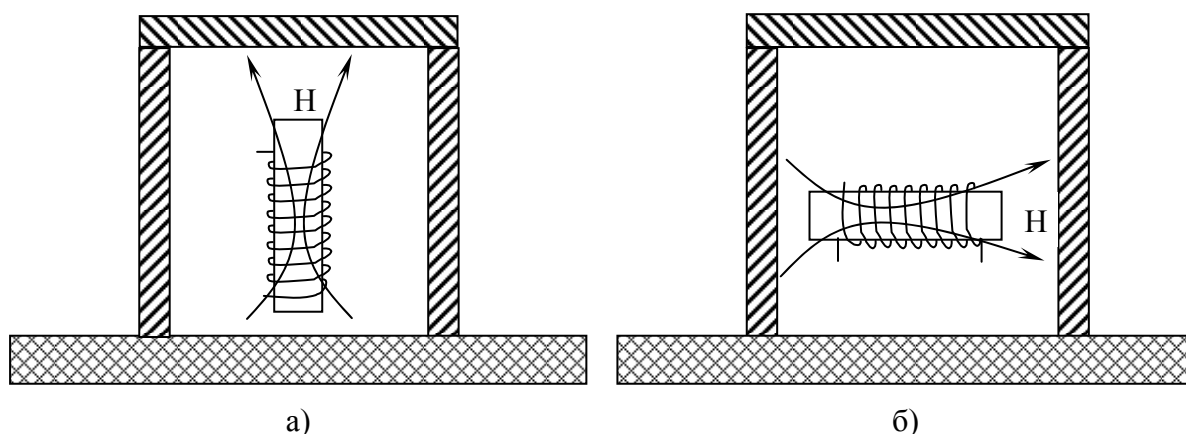


Рис. 10.10. Пример конструктивной прорези

На рис. 10.10,б эта прорезь недопустима, и чтобы обеспечить качество экранирования при такой компоновке катушки, необходима экранирующая плоскость экрана со стороны печатной платы, которая может быть выполнена фольгированной поверхностью платы.

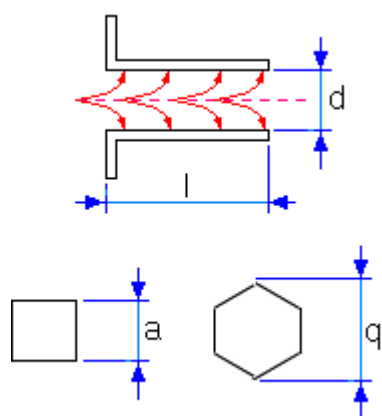


Рис. 10.11. Выполнение отверстий в электромагнитном экране

Выполнение отверстий, не пропускающих электромагнитную волну, требует применения определённых приемов.

Наиболее часто применяют специальную форму отверстий, которые называют "запретельным волноводом". Подобные отверстия выполняют путем вытягивания металла на длину  $l$  при выполнении отверстия в экране (10.11). При этом образуется некоторое подобие волновода с определенной частотой среза, выше которой электромагнитные волны не

проникают за волновод. В свою очередь, частота среза зависит от поперечных размеров сечения и длины волновода. Сечение подобных "запредельных волноводов" может быть круговым, квадратным и весьма часто в виде правильного шестиугольника ("соты").

Частота среза для волновода круглого сечения  $f_{\text{ср}} = \frac{1,75 \cdot 10^4}{d, \text{мм}}$ , Гц.

Формулы для расчета ослаблений (эффективности экранирования) для волноводов различных сечений представлены в табл. 10.1.

Таблица 10.1. Формулы для расчета ослаблений волноводов

| Вид сечения | Расчетное соотношение, дБ       |
|-------------|---------------------------------|
| Круговое    | $S = 32 \frac{1}{d}$            |
| Квадратное  | $S = 27,2 \frac{1}{a}$          |
| Сота        | $S = 27 \frac{1}{q} - 20 \lg N$ |

В экране электромагнитный ввод и вывод проводов выполняют через отверстия (рис. 10.12).

Если через отверстие в пластине из идеального проводящего материала проходит провод с высокочастотным током  $I$ , то в поверхностном слое пластины около отверстия наводятся токи  $I_{\text{н}}$  определённого направления, так что сумма токов  $I_{\text{н}} + I$  в области отверстия равна нулю. Эти токи вызывают падением напряжения в плоскости экрана около отверстия, которое может быть причиной наводки на другие провода и элементы.

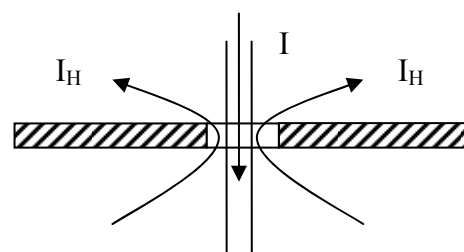


Рис. 10.12. Выполнение отверстий в электромагнитном экране

### **Особенности конструкций многослойных экранов**

Получить высокую эффективность экранирования можно, увеличивая толщину экрана или предлагая многослойный экран. Много-

слоистый экран представляет собой конструкцию экран в экране, когда между слоями экрана имеется диэлектрический зазор (рис. 10.13).

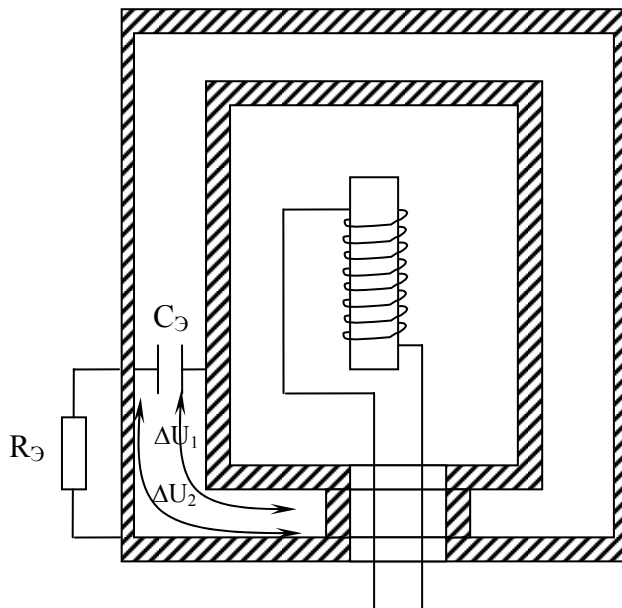


Рис. 10.13. Многослойный экран катушки

Многослойный экран обеспечивает большую эффективность экранирования, чем однослойный экран суммарной толщины. Около отверстий с проводами в плоскости экранов появляется падение напряжения, а, следовательно, разность потенциалов между экранами, которая может быть причиной наводки на провода.

Чтобы убрать разность потенциалов между экранами, замыкают экраны между собой, около отверстий распорной крепёжной втулкой.

Если экраны замкнуть между собой по всей их поверхности, то есть сделать толстый однослойный экран, то качество экранирования не улучшится.

На поверхности экранов за счёт поверхностных токов возникают падения напряжения  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$ . Если экраны соединить по всей поверхности, то  $\Delta U_1 = \Delta U_2$ . Если же между экранами получается ёмкость  $C_3$ , в случае многослойного экрана, то напряжение на втором экране меньше за счёт ёмкостного резистивного делителя

$$\Delta U_2 = \Delta U_1 \frac{R_3}{R_3 + \frac{1}{\omega \cdot C_3}},$$

где  $R_3$  – сопротивление для наведенных токов в экране.

### **Особенности конструкций секционированных экранов**

Если в ЭС имеет место несколько источников и приёмников помех, то можно исполнить один корпус – экран, который разбивается экранирующими перегородками на отдельные секции (рис. 10.14).

В первой секции находится источник помех  $A$ , на котором имеется напряжение  $E_A$ . В другой секции размещается приёмник  $B$ , который имеет паразитную ёмкость  $C_B$  на корпус. Между  $A$  и  $B$  возникает

паразитная связь за счёт ёмкости  $C_{\text{пар}}$ . Наденем на корпус экран-крышку, обеспечивающую контакт с экраном в местах крепления к корпусу по периметру.

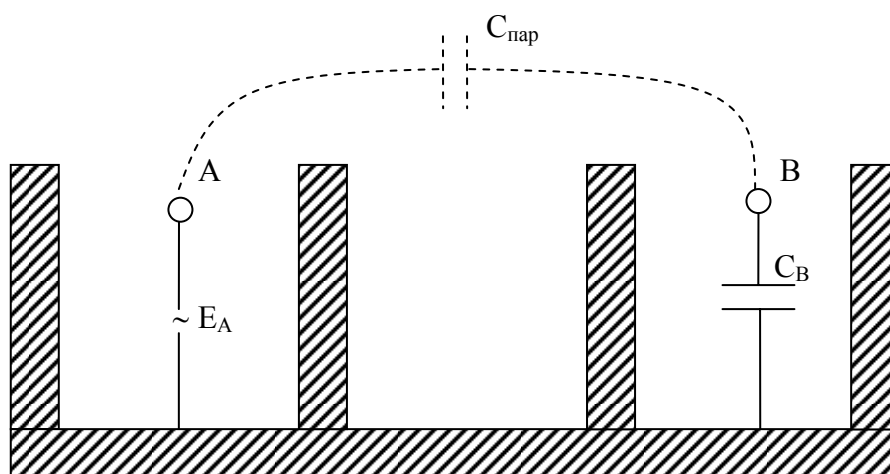


Рис. 10.14. Пример конструкции секционированного экрана

Нарисуем эквивалентную электрическую схему для паразитных связей от источника к приёмнику помех (рис. 10.15).

$C_1$  и  $C_2$  – ёмкости источника и приёмника помех относительно крышки;

$L_{23}$  – индуктивное сопротивление крышки;

$L_{21}$  и  $L_{34}$  – индуктивные сопротивления соединения крышки на корпус.

Ёмкостное сопротивление находят по формуле  $X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$ , а индуктивное сопротивление равно  $X_L = \omega \cdot L$ .

По предложенной схеме большая часть напряжения помехи  $E_A$  оказывается на крышке, а следовательно, через крышку на приёмнике В, так как индуктивное сопротивление участка 1-2  $X_L = \omega \cdot L_{12}$  много меньше ёмкостного сопротивления  $X_c = \frac{1}{\omega \cdot C_1}$ .

Для того чтобы уменьшить коэффициент передачи помехи в такой конструкции, необходимо уменьшить сопротивление соединений крышки на корпус. Для этого необходимо в каждой секционирующей перегородке обеспечить электрический контакт на крышку. В таком случае заземление крышки на корпус будет выполняться не только по

периметру крышки, но и через индуктивные параллельные ветви каждой санкционирующей перегородки.

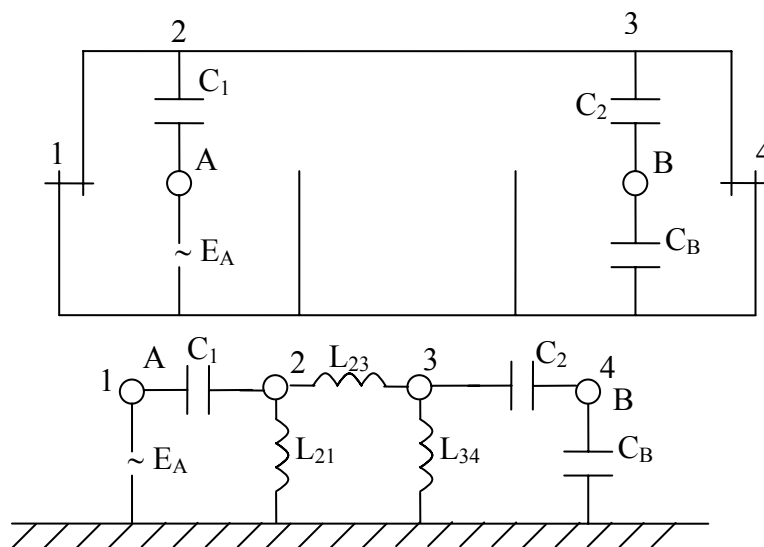


Рис. 10.15. Эквивалентная электрическая схема

Соединить каждую секцию на крышку можно через фланец перегородки винтами на крышку, а можно с помощью контактирующих пружин – губок крышки.

Если же требуется герметичное исполнение корпуса, то можно предложить между корпусом и крышкой уплотнительную прокладку из токопроводящей резины.

### 10.5. Помехи в ЭС через электромонтаж. Особенности экранирования проводов ЭС

Провода с высокочастотными или релаксационными токами являются источниками помех. Провода на входы усилителей (даже НЧ)

могут быть приёмниками помех. Для ослабления помехи можно предложить экранирование проводов (рис. 10.16).

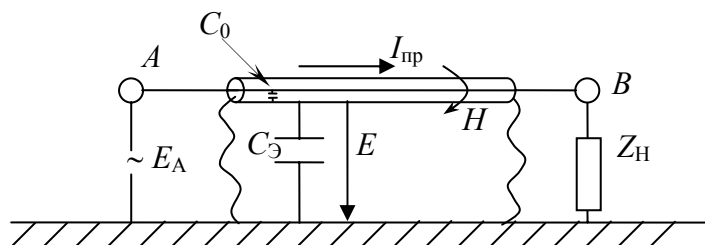


Рис. 10.16. Принцип экранирования провода

Около провода имеет место электрическое поле напряжённостью  $E$  и маг-



нитное поле напряжённостью  $H$ . Чтобы ослабить это поле, наденем на провод цилиндрический экран – оплётку. Провод относительно экрана имеет ёмкость  $C_0$ , которая гораздо больше ёмкости экрана на корпус  $C_Э$ . В таком случае на экране будет наведенное напряжение  $U_Э$ . Чтобы убрать напряжение с экрана, заземлим экран, т. е. соединим его на корпус. Заземление провода на одном конце обеспечивает электростатическое экранирование, но не обеспечивает экранирования магнитного поля, так как не создаёт замкнутого контура для наведённых токов в экране. Чтобы обеспечить экранирование магнитного поля, надо провод заземлить и на другом конце. Заземление экранирующей оплётки необходимо выполнить с минимальными значениями сопротивления, обычно самой оплёткой.

Высокое качество экранирования провода будет в том случае, если прямой ток провода равен обратному току от нагрузки, протекающему по оплетке. Это возможно в том случае, если экранирующая оплетка используется как второй провод для обратного тока. Такое возможно для случая использования экранированных проводов или коаксиальных кабелей для соединения между проводами, устройствами или блоками. В этом случае экранирующая оплетка является единственным соединителем корпусов этих ЭС.

Если же экранированный провод контактирует внутри ЭС с металлическими несущими конструкциями, то обратный ток от нагрузки проходит по оплетке и по металлическим несущим. В этом случае для повышения качества экранирования увеличивают толщину оплетки, что приближает значение обратного тока в оплетке к прямому току.

Экранирование провода имеет недостатки и ограничивает применение в конструкциях ЭС:

1. Увеличивается ёмкость провода относительно корпуса, что может быть недопустимо для некоторых проводов по электрической принципиальной схеме.

2. Экранированный провод требует изоляции или крепления в конструкции, чтобы не было заземлений на элементы конструкций, находящихся под напряжением.

3. Если длина экранированного провода соизмерима с длиной волны электромагнитных сигналов, то необходимо согласование волнового сопротивления линии с сопротивлением нагрузки.

Через печатные проводники или навесные проводники монтажа имеют место помехи с провода на провод. Такие помехи называют перекрёстными. Принцип возникновения перекрестных помех показан на рис. 10.17.

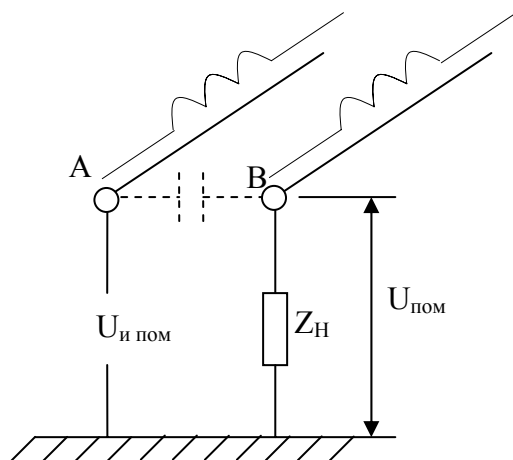


Рис. 10.17. Паразитные параметры и связи проводов

Провод А – источник помехи имеет напряжение  $U_{и\ пом}$ . Провод В – приёмник помехи не имеет прямой электрической связи с проводом А. Однако между проводами существует ёмкостная и взаимоиנדуктивная паразитная связь, а следовательно, на проводе В будет помеха  $U_{пом}$ .

Паразитные параметры монтажа в зависимости от частоты сигнала от формы импульсного сигнала оказывают следующие отрицательные влияния:

Паразитные параметры  $L_{пар}$  и  $C_{пар}$  проводов определяют реактивные сопротивления  $X_L$ ,  $X_C$  линий связи, а следовательно, линии связи вносят задержку сигнала по времени. Время распространения сигнала по линии  $t_{л} = \tau_{ол} \cdot l$ , где  $l$  – длина линии,  $\tau_{ол}$  – удельная задержка распространения сигнала в линии.

$$\tau_{ол} = \sqrt{L_{пог} \cdot C_{пог}},$$

где  $L_{пог}$ ,  $C_{пог}$  – погонные индуктивности и ёмкости линии длиной в 1 м.

Чтобы увеличить быстродействие устройства, необходимо уменьшать длину проводов линий связи  $L$  и их паразитные индуктивности и ёмкости.

И индуктивные и ёмкостные сопротивления электро монтажа зависят от частоты, а следовательно, имеют различные сопротивления для разных частотных составляющих спектра сигнала. В таком случае различные частотные составляющие сигнала, пройдя через линию, имеют на выходе другие соотношения амплитуд по сравнению с входными. Следовательно, на выходе линии сигнал получается искажённым.

При передаче релаксационных сигналов особенно сильно искажается фронт сигналов, так как длительность фронта  $\tau_{ф}$  мала по времени, а значит, имеет широкий спектр частотных составляющих.

Поэтому при проектировании линий с допустимыми искажениями сигнала необходимо сравнивать длительность фронта сигнала со временем его задержки и выполнять условие

$$t_{л} = \sqrt{L_{\text{пог}} \cdot C_{\text{пог}}} \cdot l \leq 0,1 \tau_{\text{ф}}.$$

Следовательно, неискажающая сигнал линия называется короткой линией и имеет малую длину и малые паразитные параметры монтажа.

Коэффициенты передачи с провода на провод могут быть емкостного, индуктивного и взаимноиндуктивного типа. За счет этих коэффициентов с провода на провод передается сигнал, а значит, появляется напряжение помехи на проводе В, которое может вызвать ложное срабатывание цифровых устройств или же неустойчивость работы аналоговых устройств.

Для того чтобы судить об устойчивости работы цифровых или аналоговых устройств, необходимо рассчитывать напряжение помехи  $U_{\text{пом}}$ . Для различных видов связи обобщенная эквивалентная схема паразитной связи имеет вид, представленный на рис. 10.18.

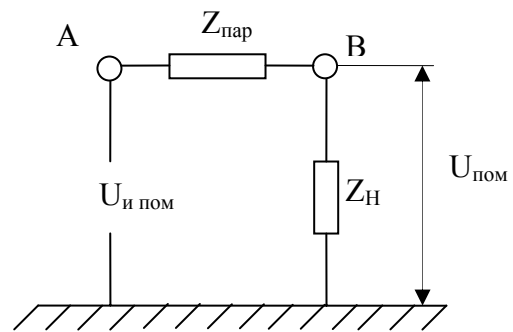


Рис. 10.18. Обобщенная эквивалентная схема паразитной связи

В общем случае: 
$$U_{\text{пом}} = U_{\text{и пом}} \frac{Z_{\text{Н}}}{Z_{\text{пар}} + Z_{\text{Н}}},$$

$$K = \frac{Z_{\text{Н}}}{Z_{\text{пар}} + Z_{\text{Н}}},$$

где  $Z_{\text{пар}}$  и  $Z_{\text{Н}}$  – комплексные сопротивления паразитной связи и нагрузки приемника.

Коэффициент передачи помехи с провода на провод будет тем меньше, чем больше паразитное сопротивление  $Z_{\text{пар}}$  между проводами.

Рассмотрим частный случай, когда  $Z_{\text{пар}}$  имеет ёмкостный характер (рис. 10.19). В таком случае 
$$K = \frac{Z_{\text{Н}}}{\frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пар}}} + Z_{\text{Н}}}.$$

В том случае, когда нагрузка ёмкостная (конденсатор  $C_B$ ), то коэффициент передачи с провода на провод

$$K_C = \frac{1}{\frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пар}}} + \frac{1}{\omega \cdot C_B}} = \frac{C_{\text{пар}}}{C_{\text{пар}} + C_B}.$$

Чтобы уменьшить ёмкостную связь с провода на провод, необходимо уменьшить паразитную ёмкость этих проводов. При наличии индуктивности проводов имеем взаимноиндуктивную паразитную связь (рис. 10.20).

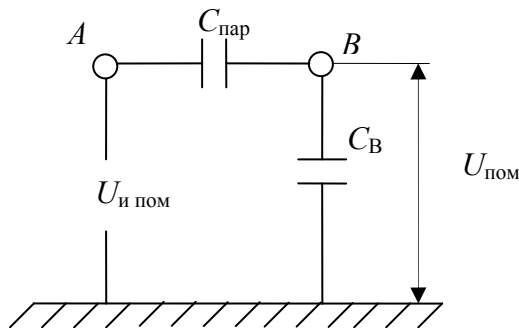


Рис. 10.19. Схема емкостной паразитной связи

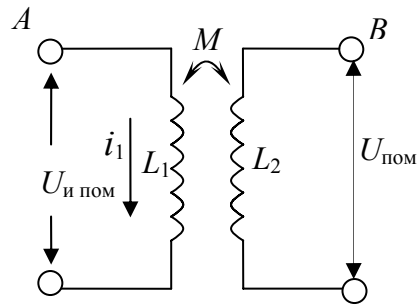


Рис. 10.20. Схема индуктивной паразитной связи

При наличии тока  $i_1$  в приводе генератора помех на высоких частотах имеем наведённые напряжения в проводе приёмника В.

$$U_{\text{пом}} = M \frac{di_1}{dt}, \quad (10.1)$$

где  $M$  – коэффициент взаимной индукции между проводами,

$\frac{di_1}{dt}$  – скорость изменения тока в приводе генератора.

Индуктированное напряжение помехи на провода генератора

$$U_{\text{и пом}} = L_1 \frac{di_1}{dt},$$

$$\frac{U_{\text{и пом}}}{L_1} = \frac{di_1}{dt}; \text{ поставим } \frac{di_1}{dt} \text{ в (10.1)}$$

$$U_{\text{пом}} = U_{\text{и пом}} \frac{M}{L_1}.$$

Следовательно, коэффициент передачи  $K_M$  с провода на провод при взаимной индуктивной связи прямо пропорционален коэффициенту взаимной индукции  $M$  и обратно пропорционален индуктивности  $L_1$  провода источника помех

$$K_M = \frac{M}{L_1}.$$

Между элементами  $A$  и  $B$  имеют место также кондуктивные паразитные связи за счёт наличия общих проводов между  $A$  и  $B$ , например проводов питания (рис. 10.21).

$Z_{\text{пар}}$  – паразитное сопротивление проводов питания.

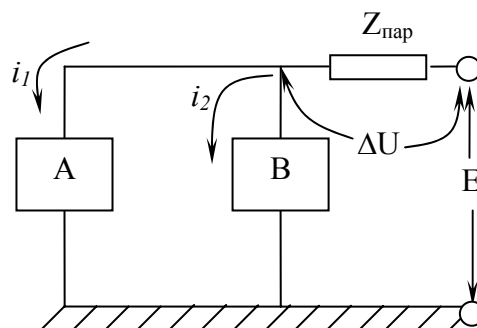


Рис. 10.21. Схема кондуктивной паразитной связи

$$Z_{\text{пар}} = R_{\text{пар}} + j \cdot \omega \cdot L_{\text{пар}}.$$

Элементы  $A$  и  $B$  имеют общий источник питания напряжением  $E$ , а значит, у них общие провода питания.

Через паразитное сопротивление проводов протекает суммарный ток  $i_1 + i_2$ , который создаёт падение напряжения на этом сопротивлении

$$\Delta U = (i_1 + i_2) Z_{\text{пар}}.$$

Напряжение питания на элементе  $A$

$$U_1 = E - \Delta U = E - (i_1 + i_2) Z_{\text{пар}}. \quad (10.2)$$

Можно видеть, что напряжение питания одного элемента зависит от токов питания других элементов. Уменьшить влияние одного элемента на другой можно, уменьшая  $Z_{\text{пар}}$ , т. е. паразитное сопротивление цепей питания.

Следовательно, уменьшить кондуктивную связь можно 1) увеличивая сечение проводов питания и уменьшая их длину; 2) уменьшая высокочастотные составляющие тока питания через источник питания, для чего в цепи питания микросхем ставят фильтрующие конденсаторы.

## 10.6. Основы расчёта паразитных параметров печатного монтажа

Паразитная ёмкость между печатными проводниками зависит от ширины печатных проводников и зазора между проводниками (рис. 10.22).

$$C_{\text{пар}} = C_{\text{пог}} \cdot l_1,$$

где  $l_1$  – длина взаимного перекрытия проводников, между которыми рассчитывается ёмкость, см,

$C_{\text{пог}}$  – погонная ёмкость между проводниками, пФ/см :

$$C_{\text{пог}} = K_{\text{п}} \cdot \varepsilon',$$

где  $\varepsilon'$  – приведённая диэлектрическая проницаемость диэлектрика в зазоре между проводниками.

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon}{2},$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость воздуха,

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала платы.

Если для влагозащиты плата покрыта лаком, то

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_{\text{л}} + \varepsilon}{2},$$

где  $\varepsilon_{\text{л}}$  – диэлектрическая проницаемость лака.

$K_{\text{п}}$  – коэффициент пропорциональности зависит от зазора между проводниками и ширины проводников, выбирается по графикам.

Зависимость коэффициента пропорциональности  $K_{\text{п}}$  от параметра печатной платы  $\frac{S}{W}$  представлена на рис. 10.23.

Чтобы уменьшить коэффициент передачи с провода на провод, рекомендуется:

1) уменьшать длину  $l_1$  смежных параллельно проходящих печатных проводников;

2) увеличивать зазор  $S$  между смежными параллельными проводниками;

3) такие проводники должны исполняться узкими, т. е. малой ширины  $W$ .

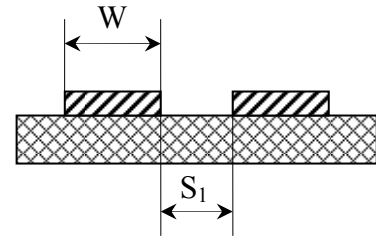


Рис. 10.22. Печатные проводники

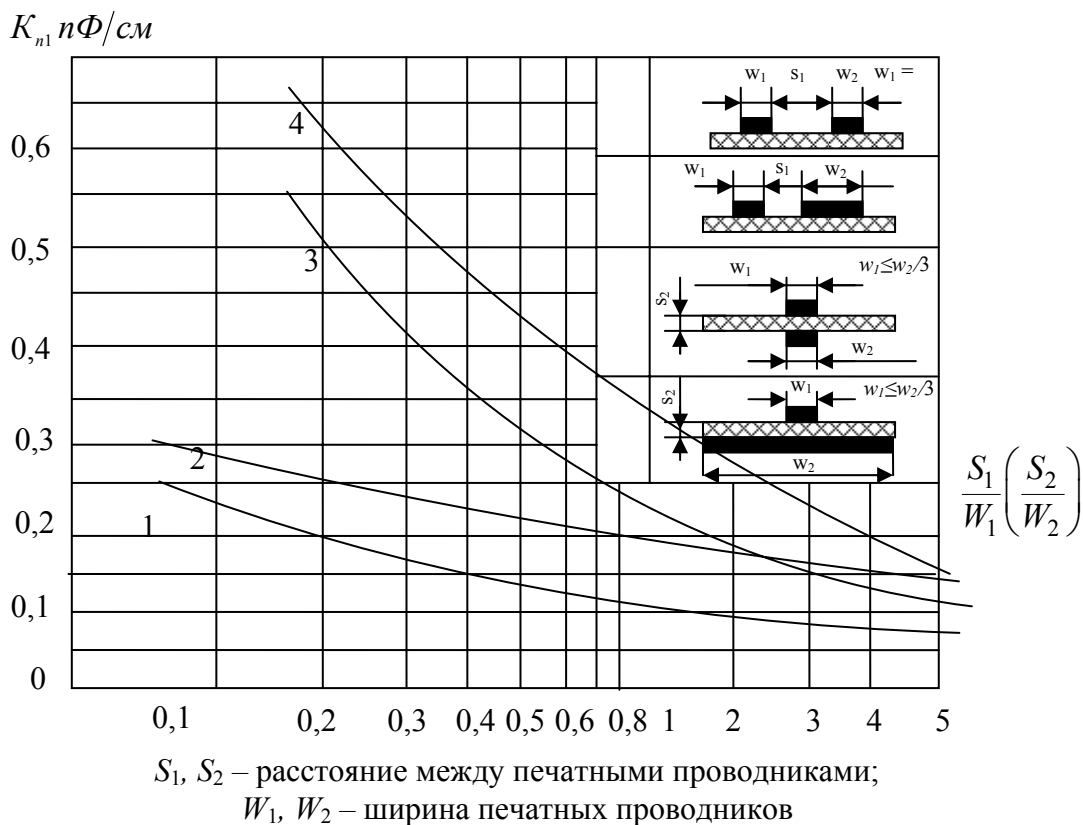


Рис. 10.23. Зависимость коэффициента пропорциональности  $K_n$  от параметра печатной платы  $S/W$

Паразитные ёмкостные связи особенно опасны в аналоговых устройствах для сигнальных цепей. Например, в усилителях особенно опасна паразитная ёмкость между входом и выходом усилителя  $C_{\text{пар}}$  (рис. 10.24).

Если ёмкость  $C_{\text{пар}}$  больше допустимых значений, то усилитель может самовозбудиться и работать в режиме автогенератора.

Усилитель самовозбудится, если в нём будет выполняться условие баланса амплитуд и баланса фаз в замкнутом кольце автогенератора

$$K_y \cdot K_{o.c} \geq 1,$$

где  $K_{o.c}$  – коэффициент обратной связи, т. е. коэффициент передачи с выхода на вход усилителя;

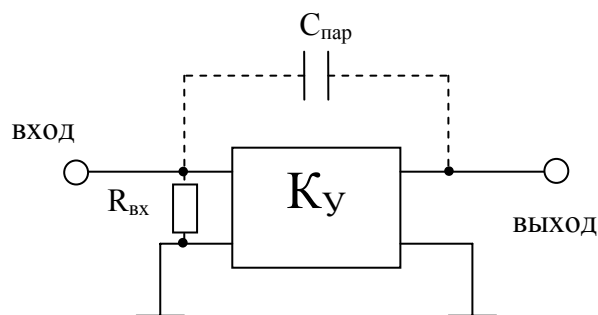


Рис. 10.24. Паразитная ёмкость вход-выход усилителя

$K_y$  – коэффициент усиления усилителя;  
 $R_{вх}$  – входное сопротивление усилителя.

$$K_{о.с} = \frac{R_{вх}}{R_{вх} + \frac{1}{\omega \cdot C_{пар}}} \approx R_{вх} \cdot \omega \cdot C_{пар}.$$

Значением  $R_{вх}$  в знаменателе пренебрегаем, так как оно много меньше емкостного сопротивления паразитной связи.

Следовательно, усилитель возбуждётся и будет работать в режиме автогенерации при условии  $K_y \cdot R_{вх} \cdot \omega \cdot C_{пар} \geq 1$ .

Чтобы усилитель не возбуждался, должно выполняться обратное неравенство, а следовательно, допустимое значение ёмкости должно быть

$$C_{пар} < \frac{1}{K_y \cdot R_{вх} \cdot \omega}.$$

Можно видеть, что усилитель легче самовозбуждается при больших коэффициентах усиления и на ВЧ. Чтобы усилитель не возбуждался, необходимо пространственно разнести вход и выход, исполнить эти цепи неширокими проводниками, расположенными непараллельно.

При проектировании многокаскадных усилителей необходимо компоновать их в линию (линейка усиления), пространственно разнося выходы с сильным сигналом от входов.

Для цифровых микросхем в технических условиях указывают допустимые паразитные ёмкости по конкретным выводам сигнальных цепей.

Для случая взаимоиндуктивной связи коэффициент взаимоиндукции  $M$ , мГн, между печатными проводниками рассчитывается по формуле

$$M = 2l_2 \left( \ln \frac{2l_2}{S_1 + 0,5(W_1 + W_2)} - 1 \right),$$

где  $l_2$  – длина параллельно проходящих печатных проводников.

Если вторая плоскость печатной платы полностью фольгированная и используется как экранирующая, то коэффициент взаимоиндук-



ции между печатными проводниками увеличивается и рассчитывается по формуле

$$M = 2l_2 \left( \ln \frac{2l_2}{S_1 + 0,5(W_1 + W_2)} + \frac{S_1 + 0,5(W_1 + W_2)}{S_2} \right),$$

где  $S_2$  – расстояние между плоскостями верхнего монтажа и фольги, т. е. толщина платы.

Чтобы уменьшить коэффициент передачи при взаимоиндуктивной связи проводников, рекомендуется:

1) уменьшать длину  $l_2$  параллельного прохождения сигнальных цепей печатного монтажа;

2) увеличивать зазор  $S_1$  между параллельно проходящими сигнальными цепями;

3) рекомендуется также цепи исполнять непараллельно, например, в разных плоскостях перпендикулярно.

Индуктивность печатных проводников определяется по формуле

$$L = L_{\text{пог}} \cdot l_2,$$

где  $L_{\text{пог}}$  – погонная индуктивность, мкГн/см, (индуктивность единицы длины проводника) зависит от сечения проводника, т. е. от ширины и толщины проводника.

Величина погонной индуктивности печатного проводника определяется по графику. Зависимость погонной индуктивности печатного проводника  $L_{\text{пог}}$  от его ширины  $W$  при толщине проводника 0,05 мм показана на рис. 10.25.

Можно видеть, что чем шире проводник, тем меньше его индуктивность. Поэтому для сигнальных цепей, чтобы уменьшить коэффициент взаимоиндуктивной связи, рекомендуется выполнять проводники узкими.

Для уменьшения кондуктивной паразитной связи по цепям питания необходимо выполнять цепи питания – потенциальный и корпусной провод большой ширины

$$Z_{\text{пар}} = R_{\text{пар}} + j \cdot \omega \cdot L_{\text{пог}}.$$

Поэтому цепи питания и цепи корпуса рекомендуют выполнять шириной печатного проводника 3 – 5 мм и более.

Увеличивать сечение потенциального провода питания и провода корпуса, не мешая трассировке сигнальных цепей, можно за счёт следующего:

1. Исполнять несколько параллельных цепей корпуса и питание на плате, увеличивая этим результирующую ширину и сокращая длину этих цепей на каждую микросхему.

2. Вместо печатных проводников использовать навесные шины питания.

3. Шины питания и шины корпуса можно и лучше располагать параллельно и рядом, так как большая ёмкость между ними будет работать как фильтрующая конструктивно выполненная ёмкость.

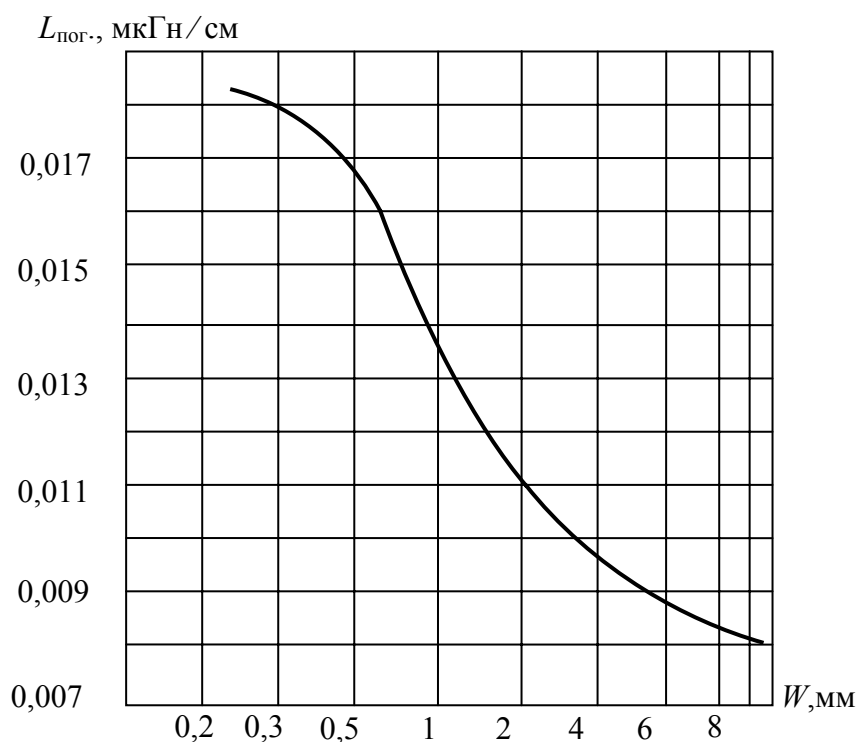


Рис. 10.25. Зависимость погонной индуктивности печатного проводника от его ширины

### ***Фильтрация напряжений наводки в проводах. Особенности проектирования фильтров***

Помеха от источника к приёмнику может пройти через общие для них провода (через сигнальные цепи от одного устройства к другому) или через общие цепи питания. Для ослабления помехи через общие цепи до допустимых значений в эти цепи ставят фильтры.

На рис. 10.26. представлена эквивалентная схема включения фильтра в цепь передачи сигнала от генератора к нагрузке.

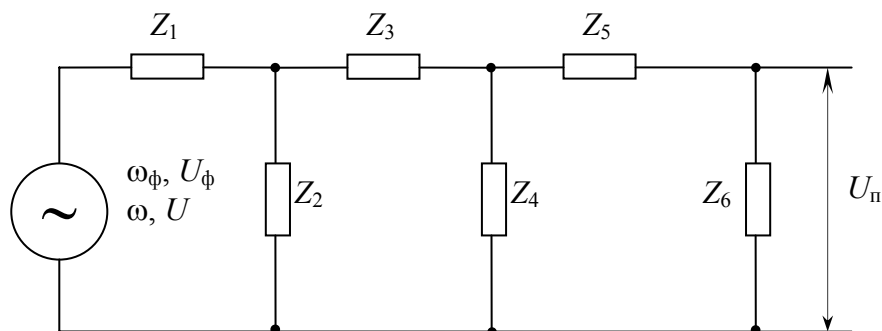


Рис. 10.26. Эквивалентная схема включения фильтра

$\omega$ ,  $U$  – рабочая частота и рабочее напряжение генератора;

$\omega_{\phi}$ ,  $U_{\phi}$  – частота и напряжение фильтруемой помехи.

Напряжение помехи  $U_{\Pi}$  на выходе фильтра зависит от величины и содержания сопротивлений  $Z_i$  фильтра.

Напряжение помехи для одного звена фильтра будет равно

$$U_{\Pi 1} = U_{\phi} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \approx U_{\phi} \frac{Z_2}{Z_1},$$

так как сопротивление  $Z_2 \ll Z_1$  на фильтруемой частоте.

Аналогично для многозвенного фильтра

$$U_{\Pi} = U \frac{Z_2}{Z_1} \frac{Z_4}{Z_3} \frac{Z_6}{Z_5} \dots$$

Следовательно, коэффициент передачи фильтра

$$K = \frac{Z_2}{Z_1} \frac{Z_4}{Z_3} \frac{Z_6}{Z_5} \dots$$

На фильтруемой частоте сопротивление параллельных ветвей  $Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6 \dots$  должно быть минимально, а сопротивление последовательных ветвей  $Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_5 \dots$  должно быть максимально.

Так как емкостное сопротивление  $X_C$  обратно пропорционально частоте, а индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте, его обычно экранизируют, чтобы от высокочастотного фильтра не было электромагнитных помех.

Для уменьшения коэффициента передачи помехи фильтром необходимо выполнять определенные требования к компоновке фильтра.

Пример неудачной компоновки фильтра показан на рис. 10.27.

Учитывая, что  $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$  и с ростом частоты падает, а  $X_L = \omega \cdot L$  и с увеличением частоты растет, фильтр должен содержать конденсаторы в параллельных ветвях и дроссели (индуктивности) в последовательных ветвях.

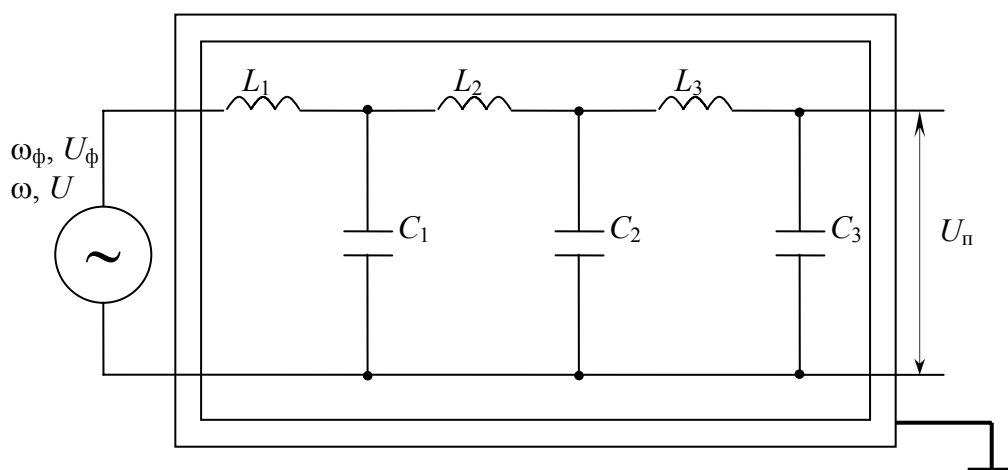


Рис. 10.27. Неудачная компоновка фильтра

Эта компоновка имеет следующие недостатки исполнения:

1. Индуктивности трех звеньев фильтра, расположенных рядом, не экранированы, следовательно, имеют взаимоиндуктивную связь, а значит, передают помеху за счет взаимоиндуктивной связи.

2. Конденсаторы фильтра соединяются между собой, а затем на корпусе общим проводом, что вызывает падение напряжения помехи на общем проводе, которое передается на выход фильтра.

Индуктивности звеньев фильтра соединяются между собой и общим проводом на конденсатор, что увеличивает сопротивление параллельной ветви и падение напряжения помехи в ней.

3. Если общий провод корпуса генератора проходит внутри фильтра, то на нём будет иметь место наводка напряжения помехи от звеньев фильтра.

Пример рациональной компоновки показан на рис. 10.28., где индуктивности соединяются на конденсаторы, а конденсаторы – на корпус своими выводами без общего провода; индуктивности фильтра экранированы друг от друга секционирующими перегородками кор-

пуса фильтра; провод корпуса не проходит внутри фильтра, а в качестве провода используется сам корпус фильтра.

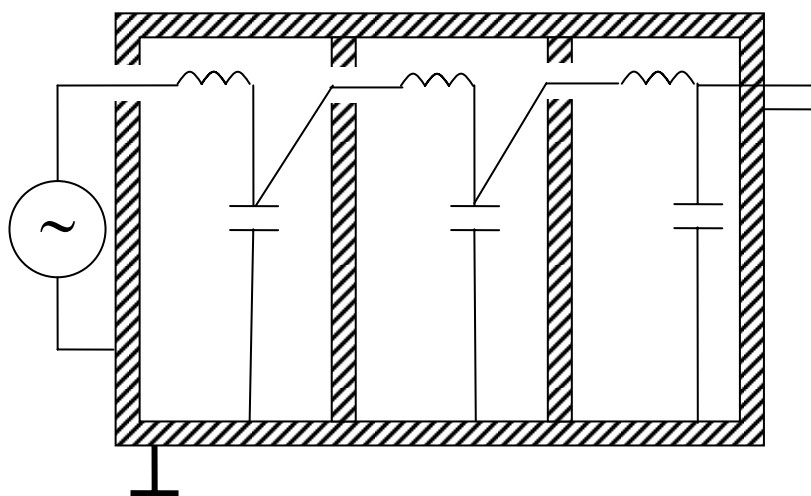


Рис. 10.28. Рациональная компоновка фильтра

Количество звеньев и номиналы элементов фильтра зависят от фильтруемой частоты и требуемого коэффициента ослабления.

Чем выше частота фильтруемой помехи, тем меньше значение ёмкости и индуктивности фильтра. Самый простой фильтр может содержать одно звено, т. е. индуктивность-ёмкость, а то и просто фильтрующий конденсатор. Например, в цепи питания микросхем, цифровых устройств часто ставят конденсатор. Эти конденсаторы необходимо размещать непосредственно около микросхем на плате с тем, чтобы отфильтровать высокочастотные составляющие через источник питания.

### ***Особенности проектирования цепей питания и корпуса ЭС***

Цепи питания и цепи корпуса являются общими для источников и приёмников помех на плате, а поэтому, чтобы уменьшить кондуктивную паразитную связь, они должны выполняться малого активного и индуктивного сопротивления. Следовательно, эти цепи должны выполняться большой ширины на плате или же навесными проводами.

Цепи питания и корпуса при ограниченной площади платы можно выполнить навесными медными шинами с зазором над платой, что позволяет использовать площадь платы для печатных проводников. Если же цепи корпуса и питания на печатной плате исполняют боль-

шой ширины, то для облегчения условий трассировки их обычно располагают по краю платы двумя параллельными цепями.

Для межъячеечных и межплатных соединений в ЭС может использоваться коммутационная печатная плата с параллельным соединением печатных проводников по цепям питания и корпуса, как показано на рис. 10.29.

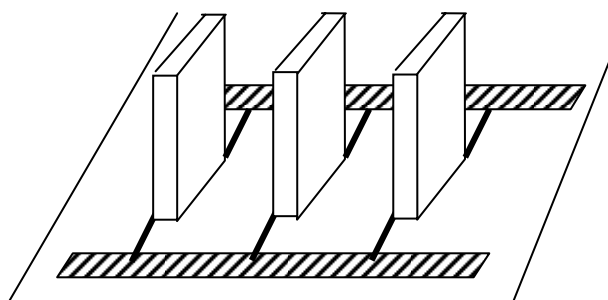


Рис. 10.29. Коммутационная печатная плата

Каждую цепь корпуса на ячейке и на коммутационной печатной плате можно выводить на отдельный контакт разъема. Если в ЭС используется навесной проводной монтаж межъячеечных или межблочных соединений, то цепь корпуса может выполняться проводом достаточного сече-

ния при последовательном соединении цепей корпуса ячеек.

При последовательном соединении имеем небольшое сопротивление. Соединения между платами могут выполняться последовательно толстым медным проводом в изоляции. В случае, когда эти цепи исполняются на печатных платах печатными проводниками, то уменьшить их результирующее сопротивление можно параллельным использованием нескольких ветвей. Это позволяет подключаться к питанию или к корпусу каждым элементом кратчайшим путём к ближайшей шине. Каждую такую цепь можно выводить на свой самостоятельный контакт разъёма.

Соединение цепей корпуса на металлический корпус прибора или устройства выполняют навесным проводом-шиной на соединительный контакт на корпусе.

Соединение медного провода заземления на алюминиевый корпус непосредственно не допускается, так как медь и алюминий – неприемлемая для контакта пара. Наблюдается электрохимическая коррозия и разрушение. Соединение на корпус можно выполнить через биметаллический лепесток, который крепится контактной сваркой. Биметаллический лепесток исполнен из листового алюминия, плакированного медью (АПМ). Лепесток устанавливают алюминиевой стороной на алюминиевый корпус и паяют к проводам по плакирующему слою меди.

При изготовлении несущей конструкции из мягкого пластичного материала (магниевые, алюминиевые сплавы) можно сделать соединение с помощью винта-самореза с хорошей влагозащитой предлагаемого соединения.

Винт-саморез вворачивают в металлические конструкции и запаивают на лепесток. Для влагозащиты всё покрывают лаком, а лучше компаундом.

### 10.7. Обеспечение электрической прочности в конструкциях ЭС

Электрические поля в конструкциях ЭС могут вызвать пробой воздушных промежутков. Особенно часто такая опасность возникает в мощной передающей аппаратуре, которая строится на генераторных лампах, работающих на высоких питающих напряжениях (рис. 10.30).

Диапазон частот чрезвычайно широк.

Исследования зависимости разрядного напряжения от частоты поля в воздухе при нормальных условиях позволяют разбить весь частотный диапазон на ряд поддиапазонов, в каждом из которых проявляется свой механизм развития разряда. На рис.10.30 показан характер развития разрядного напряжения в зависимости от частоты питающего поля. При изменении частоты от 0 до  $f_{кр1}$  разрядное напряжение практически не зависит от частоты и определяется ударной ионизацией под действием электронов, приобретающих дополнительную энергию за счет электрического поля. Интенсивность ионизации в основном определяется энергией ионизации газа и средней длиной свободного пробега электронов в данном газе.

Чтобы произошел пробой, число электронов, способных ионизировать частицы в воздушном промежутке в электрическом поле напряженностью  $E$ , должно непрерывно возрастать, т. е. процесс образования ионов должен быть лавинообразным. Единичный электрон,

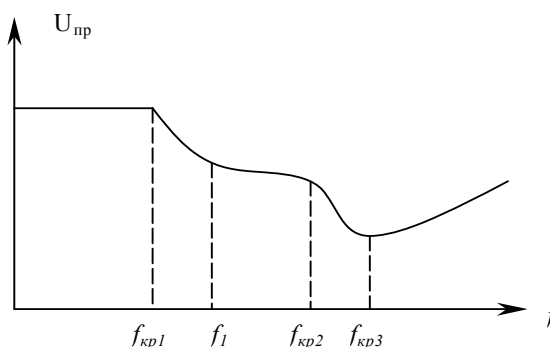


Рис. 10.30. Зависимость разрядного напряжения от частоты

вылетевший с катода, двигаясь в направлении анода, может при столкновении с молекулой (или атомом) вызвать ионизацию, и таким образом появляется ион и второй электрон. При определенных условиях процесс будет нарастать лавинообразно.

При неизменной температуре пробивное напряжение газа в однородном поле является функцией произведения давления  $P$  и расстояния  $S$  между электродами (рис. 10.31).

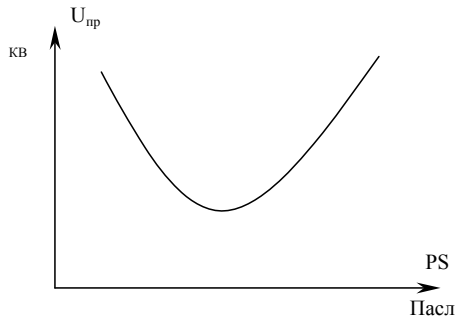


Рис. 10.31. Зависимость пробивного напряжения от величины  $PS$

При атмосферных давлениях, заданных условиями эксплуатации наземной и самолетной (вертолетной) аппаратуры, пробивное напряжение соответствует правой части ветви. Аппроксимируя правую ветвь этой зависимости, можно получить простое выражение для пробивного напряжения:

$U_{пр} = a_0 \cdot PS + b \sqrt{PS}$  – формула закона Пашена. Вводя в нее относительное давление  $P/P_0$ ,

где  $P_0 = 101,3$  кПа – давление при нормальных условиях (при  $T = 293$  К), имеем  $U_{пр} = a_0 P/(P_0 S) + b_0 \sqrt{P/(P_0 S)}$ . Числовые значения  $a_0$  и  $b_0$  приведены в табл. 10.2.

Таблица 10.2. Числовые значения  $a_0$  и  $b_0$  для различных газов

| Постоянная          | Значения $a_0, b_0$ газов |                |                |      |      |
|---------------------|---------------------------|----------------|----------------|------|------|
|                     | Воздух                    | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | Ar   | He   |
| $a_0, \text{кВ/см}$ | 24,5                      | 26,0           | 23,5           | 5,7  | 2,01 |
| $b_0, \text{кВ/см}$ | 6,40                      | 6,35           | 9,55           | 2,26 | 2,53 |

Приведенная формула позволяет рассчитать зазоры  $S$  и оценить электрическую прочность промежутка для различных давлений при эксплуатации.

Можно видеть, что при пониженных атмосферных давлениях самолетной, носимой, автомобильной аппаратуры необходимо рассчитывать электрическую прочность минимальных зазоров между элементами печатного монтажа или между элементами, находящимися под высокими напряжениями.



Герметичные конструкции ЭС для надежности герметизации иногда заполняют инертным газом с избыточным давлением. Учитывая, что электрическая прочность инертных газов в несколько раз меньше, чем у воздуха, тем более требуется расчет электрической прочности.

Начиная с частоты  $f_{кр1}$ , разрядное напряжение с ростом частоты падает, что связано с особенностями образования объемных зарядов. Ионизация в промежутке возникает при напряжении меньше  $U_{пр}$ . В диапазоне частот от 0 до  $f_{кр1}$  ионы, возникающие в некоторый полупериод, в течение этого же полупериода успевают дойти до электродов. Поэтому в следующий полупериод процесс начинается при отсутствии объемного заряда. При частотах выше  $f_{кр1}$  часть ионов уже не успевает дойти до электродов, главную роль при этом играют положительные ионы, причем число оставшихся ионов от полупериода к полупериоду возрастает, создается значительный объемный заряд, который и приводит к снижению пробивного напряжения. Первая критическая частота зависит от давления газа между электродами. С увеличением расстояния эта частота уменьшается. Так обстоят дела до частоты  $f_1$ . Дальнейшее увеличение частоты почти не приводит к снижению разрядного напряжения. По-видимому, это связано с тем, что объемный заряд в промежутке перестает увеличиваться. Наступает динамическое равновесие между скоростью образования новых ионов и диффузией объемного заряда на электроды.

За второй критической частотой  $f_{кр2}$  происходит новое снижение разрядного напряжения. При этом полупериод оказывается меньше времени пробега электронами межэлектродного пространства. Часть электронов не успевает уходить на электроды и, оставаясь в промежутке, продолжает участвовать в ионизации, и разрядное напряжение снижается. С увеличением частоты увеличивается насыщение объемного заряда и разрядное напряжение падает.

При очень больших частотах, превышающих  $f_{кр3}$ , возможно возрастание разрядного напряжения. При этом полупериод настолько мал, что некоторые электроны не успевают осуществить ни одного акта ионизации. Чтобы началась ионизация, необходимо увеличить напряжение, т. е. скорость движения электрона, и уменьшить тем самым среднее время между столкновениями.

Кроме рассмотренного разряда, может наблюдаться **коронный** (тлеющий) разряд на токонесущих частях конструкции. Напряжен-

ность, при которой возникает коронный разряд, можно найти по выражению Пика

$$E = 30,3 \delta (1 + 0,298 / (\sqrt{\delta r_0})) .$$

Это выражение справедливо при  $r_0 < 1$  см,  
где  $r_0$  – радиус изгиба элемента конструкции;

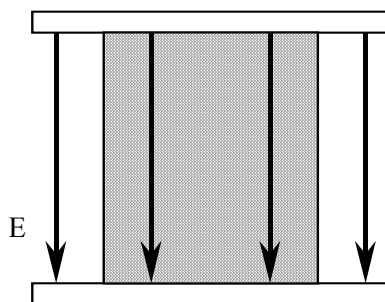
$\delta$  – относительная плотность воздуха при произвольном давлении и температуре.

Пробивное напряжение и напряжение возникновения коронного разряда, определяемые по приведенным формулам, будут верны только в том случае, если между токонесущими элементами конструкции нет твердых диэлектриков.

### ***Влияние диэлектриков на разрядное напряжение***

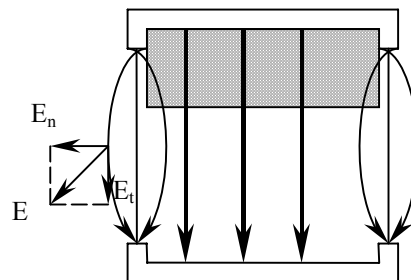
Введение диэлектриков в воздушный промежуток изменяет условия и механизм развития разряда. Разрядное напряжение, как правило, снижается и зависит от формы электрического поля, свойств диэлектрика и состояния его поверхности.

На рис. 10.32 и 10.33 представлены схемы конструкций с однородным и неоднородным электрическим полем.



С однородным электрическим полем

*Рис. 10.32. Конструкция с однородным полем*



С неоднородным электрическим полем

*Рис. 10.33. Конструкция с неоднородным полем*

В конструкции с неоднородным электрическим полем во всех точках поверхности диэлектрика тангенциальная составляющая напряженности  $E_t$ , направленная вдоль поверхности диэлектрика, преобладает над нормальной составляющей.

В однородном поле в присутствии диэлектрика разряд всегда развивается вдоль поверхности диэлектрика, а разрядное напряжение снижается по сравнению с чисто воздушным промежутком. Экспериментально установлено, что существенную роль в уменьшении разрядного напряжения играет влага, адсорбированная на поверхности диэлектрика. Материалы, обладающие более высокой поверхностной гигроскопичностью (гетинакс, стеклотекстолит) дают большее снижение разрядного напряжения, чем материалы с меньшей поверхностной гигроскопичностью (винипласт, керамика глазурованная, парафин). На рис. 10.34 приведены графики, полученные для электрического поля частотой 50 Гц.

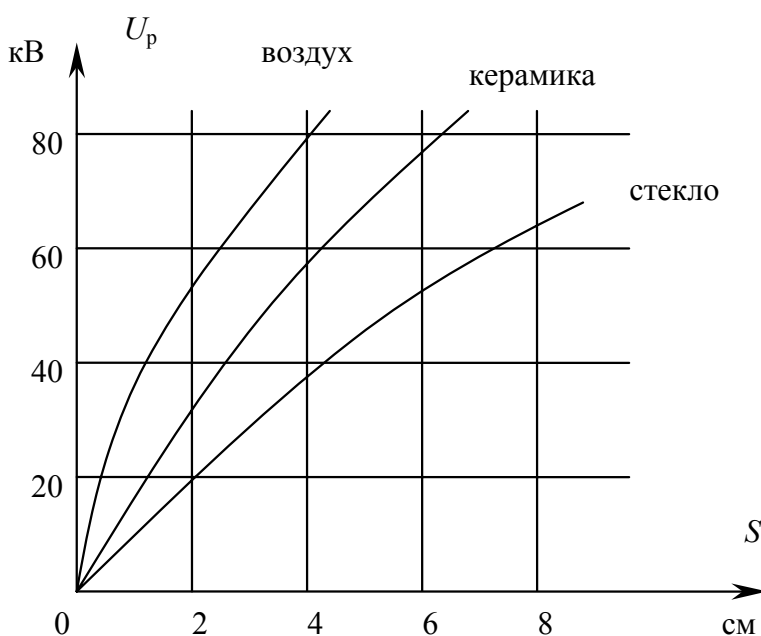


Рис. 10.34. Зависимость разрядного напряжения от расстояния

Адсорбированная на поверхности диэлектрика влага содержит ионы обоих знаков, которые в электрическом поле смещаются, образуя объемные заряды. В этих условиях поле в середине промежутка ослабляется, а вблизи электродов усиливается. Это снижает разрядное напряжение.

В резко неоднородном электрическом поле разрядное напряжение при прочих равных условиях ниже, чем в однородном электрическом поле. Адсорбированная на поверхности влага значительно сла-

бее сказывается на пробивном напряжении. Это можно объяснить тем, что процессы в адсорбированной на поверхности влаги могут лишь незначительно добавочно увеличить и без того большую неоднородность поля.

Снижение электрической прочности диэлектрика может происходить за счет старения (электрохимические процессы) и за счет теплового старения. Тепловое старение происходит вследствие ускорения химических процессов в изоляционных материалах.

## **10.8. Обеспечение стойкости ЭС к ионизирующим излучениям**

### ***1. Ионизирующее излучение ядерного взрыва***

Огромное количество энергии проявляется на определенных расстояниях от места взрыва в виде энергии светового (теплового) излучения, на долю которой приходится при типичном воздушном взрыве около 35 % всей энергии, 50 % энергии проявляется в виде энергии ударной волны, 10 % – остаточного ядерного излучения и 5 % – мгновенного ядерного излучения.

Начальное и остаточное ядерные излучения взаимодействуют с атмосферой, выбивая электроны из атомов и молекул, превращая их в положительные ионы. Наличие большого числа электронов и ионов на больших высотах может привести к существенному ухудшению условий распространения радиоволн: свободные электроны, образованные в результате ионизации гамма-квантами, могут также взаимодействовать с магнитным полем земли, генерируя сильные электромагнитные излучения, способные привести к повреждению незащищенных ЭРЭ и ЭС в целом на больших расстояниях от центра взрыва.

К начальным и остаточным излучениям ядерного взрыва относятся:

- нейтроны,
- гамма-кванты,
- рентгеновские кванты,
- заряженные частицы ( $\alpha$  и  $\beta$ ).

Гамма-кванты, образующиеся в результате деления, синтеза, захвата нейтронов неупругого рассеяния и радиоактивного распада, распространяются в пространстве со скоростью света, затухая обратно пропорционально квадрату расстояния. Гамма-излучение, образу-

щееся в цепных реакциях деления и синтеза, принято называть мгновенным гамма-излучением; гамма-излучение, образующееся в результате неупругого рассеяния и захвата нейтронов окружающей средой – захватным, а гамма-излучение радиоактивных ядер осколков деления – осколочным гамма-излучением.

Защита от проникновения гамма-квантов через корпус объектов к ЭС с помощью поглощающих экранов является сложной задачей, так как для уменьшения уровня мгновенного гамма-излучения в 10 раз требуется свинцовая защита толщиной примерно 5 см.

В табл. 10.3 приведены значения толщины разных экранов для десятикратного ослабления гамма-квантов.

Таблица 10.3. Толщина экрана десятикратного ослабления

| Материал | Плотность<br>$\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Гамма-кванты за 10 с<br>продуктов взрыва |                              | Вторичные гамма-<br>кванты захвата<br>нейтронов |                              |
|----------|---|--|------------------------------|---|------------------------------|
|          |   | Толщина<br>$L$ , см                      | $\rho L$ , г/см <sup>2</sup> | Толщина<br>$L$ , см                             | $\rho L$ , г/см <sup>2</sup> |
| Сталь    | 7,84                                    | 9,3                                      | 75                           | 13,3  | 107,5                        |
| Бетон    | 2,3                                     | 30                                       | 72,5                         | 45  | 107,5                        |
| Грунт    | 1,6                                     | 45                                       | 75                           | 65  | 107,5                        |
| Вода     | 1                                       | 65                                       | 65                           | 95  | 95                           |
| Дерево   | 0,55                                    | 125                                      | 70                           | 175   | 100                          |

Для приближенной оценки толщина слоя десятикратного ослабления любого материала можно воспользоваться приближенным соотношением:

$\rho L = 75$  г/см<sup>3</sup> для мгновенных и  $\rho L = 107,5$  г/см<sup>3</sup> для вторичных гамма-квантов.

Нейтроны, освобождающиеся при ядерном взрыве в процессе деления или синтеза, распространяются в пространстве со скоростью, зависящей от их энергии. Быстрые нейтроны с энергией  $W = 1$  МэВ имеют скорость около  $1,4 \cdot 10^7$  м/с, тепловые –  $2,2 \cdot 10^3$  м/с.

По мере удаления от места взрыва имеют место столкновения нейтронов с атомами окружающего вещества и поглощения. Общее количество нейтронов, приходящееся на единицу площади рассмат-

риваемого объекта, тем меньше, чем дальше объект от центра взрыва. Защита от действия нейтронов более сложная проблема, чем защита от гамма-квантов. Сложность обусловлена тем, что при поглощении нейтронов испускаются гамма-кванты. Следовательно, защитный экран должен одновременно замедлять быстрые нейтроны до уровня тепловых, поглощать нейтроны и предотвращать дальнейшее распространение гамма-квантов. Это предполагает сочетание в одном материале свойств водородосодержащих материалов, обладающих высокой способностью к замедлению нейтронов и тяжелых материалов, эффективно защищающих от действия гамма-квантов.

## ***2. Эффекты в материалах ЭРЭ от излучения ядерного взрыва***

В материалах полупроводниковых и прочих ЭРЭ возникают эффекты смещения, ионизации, переноса заряда, тепловые и прочие, представленные на рис. 10.35.

**Эффекты смещения** представляют собой перемещение атомов из своего нормального положения в кристаллической решетке материала.

Эти перемещения сопровождаются возникновением структурных дефектов кристаллической решетки, к простейшим из них относят свободные положения в решетке «вакансии» и дополнительные атомы между ее узлами (межузельные внедрения).

В электронных узлах эффекты смещения влияют в основном на работу полупроводниковых приборов, поскольку приводят к существенному изменению времени жизни неосновных носителей; их концентрации и подвижности, зависящих от уровня излучения. Изменения параметров ППП зависят от плотности потока нейтронов, а длительность процесса восстановления в основном от свойств материалов и режима работы ЭРЭ. Кратковременные изменения параметров из-за импульса нейтронов могут привести к полной потере работоспособности аппаратуры на период их времени восстановления.

**Эффекты переноса** заряда обусловлены передачей кинетической энергии ионизирующего излучения вторичным частицам и проявляются в виде неустановившихся токов, а также захваченного диэлектриком заряда.

При движении вторичных заряженных частиц (например, комптоновских электронов, возникающих под действием фотонов высоких энергий или протонов отдачи, возникающих при взаимодействии

нейтронов с водородосодержащими веществами) создаются электрические и магнитные поля, а также протекают неустановившиеся токи, зависящие от мощности дозы излучения.

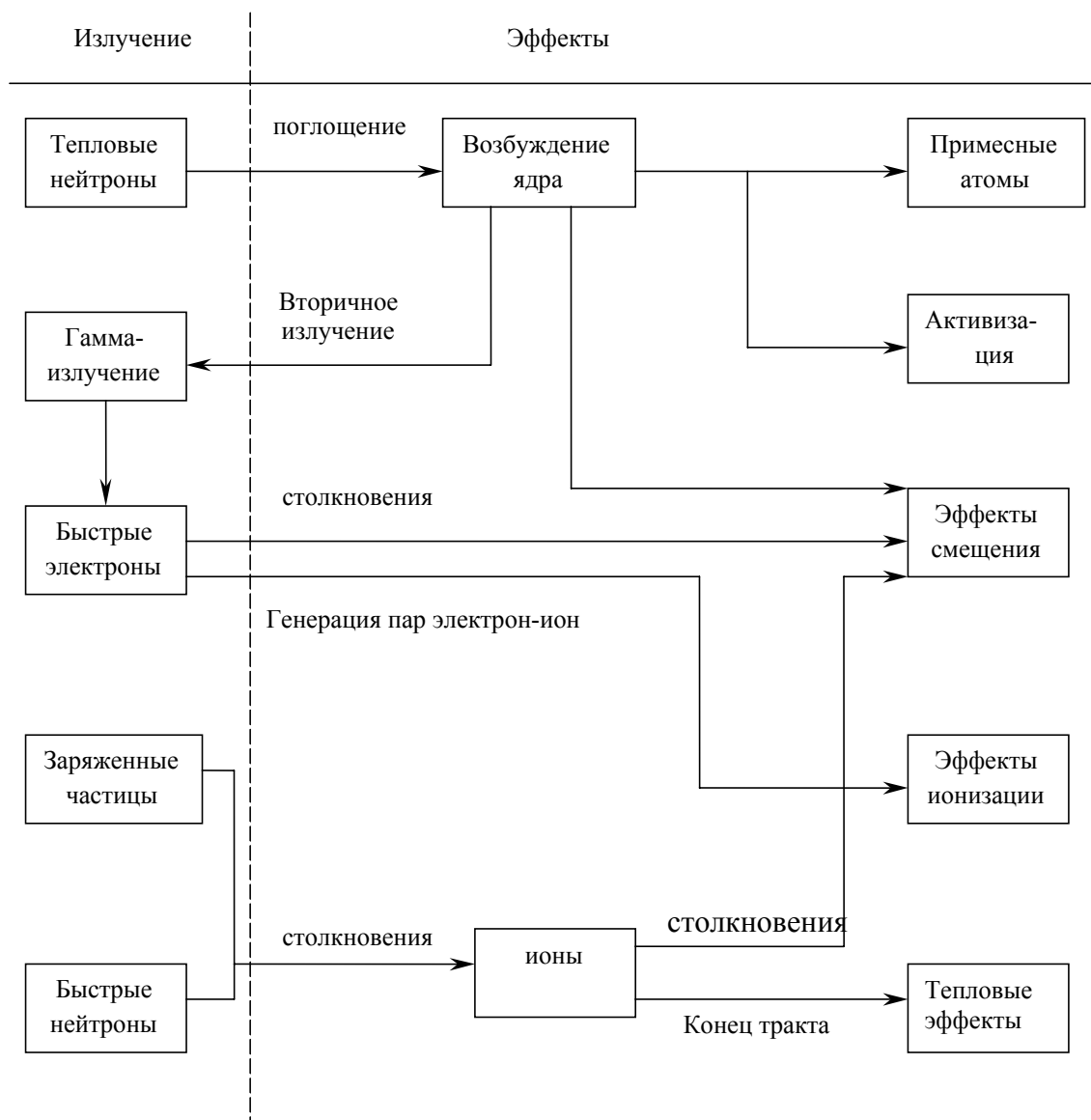


Рис. 10.35. Виды эффектов, вызываемые различными видами излучения

Эти эффекты могут привести к появлению ложных сигналов или сбояв в ЭС или к пропаданию полезных сигналов, а также при недостаточной электрической прочности входных и выходных цепей к их перегоранию.

**Ионизация.** Входящие в состав ИИ заряженные частицы как первичные, так и вторичные выделяют в веществе энергию преимущественно путем образования вдоль траектории движения электрон-

но-ионных пар. Ионизационными называются эффекты, вызванные этими низкоэнергетическими заряженными носителями. Они отличаются от эффектов переноса зарядов, которые определяются как смещение зарядов высокоэнергетическими частицами.

Число образующихся электронно-дырочных пар независимо от вида первичных частиц определяется только количеством энергии, выделяемой на ионизацию. Ионизационные эффекты проявляются в виде переходных эффектов (эффекты свободных носителей): промежуточных релаксационных, долговременных эффектов захваченных носителей и химических.

Возрастание числа свободных электронов и ионизированных атомов приводит к изменению электрофизических характеристик материала (удельное сопротивление, диэлектрические потери и т. п.) и формированию во внешних цепях ЭРЭ приращений токов. Из-за высокой подвижности свободных носителей неравновесное состояние обычно быстро исчезает после прекращения излучения.

Первичные ионизационные токи в ППП могут усиливаться, и на выходе электрической схемы появятся усиленные вторичные токи, зависящие от схемы и режима работы активных элементов.

В диэлектриках появление полей вызывает ухудшение электрической прочности. В результате действия ионизационных токов возникают обратные изменения параметров аппаратуры, находящейся во включенном состоянии, что может приводить к временной потере ее работоспособности, ложным срабатываниям, сбоям и пропаданию полезного сигнала.

**Эффекты, вызванные действиями ЭМИ.** В общем случае при действии ЭМИ в электронных средствах имеют место следующие эффекты:

- проникновение ЭМИ внутрь корпуса ЭС и искажение внутренних электрических и магнитных полей;
- возникновение ЭДС и токов на корпусах, выводах, проводах и других проводящих элементах;
- возникновение на изделиях ЭС импульсов, приходящих с других ЭС паразитных антенн.

Наиболее существенна и опасна импульсная наводка в длинных линиях связи, в антенных цепях.

При воздействии импульсных перенапряжений в ЭС могут наблюдаться:

- пробой *p-n*-переходов у ППП;



- пробой вакуумных и газонаполненных промежутков;
- расплавление и обрывы токоведущих дорожек из-за термо- и электродинамических напряжений;
- сбой в работе и появление ложных сигналов.

При воздействии достаточно мощных и коротких по длительности ЭМИ иногда наблюдается эффект электродинамического отрыва выводов транзисторов от траверсов в месте их соединения.

### ***3. Методы защиты ЭС от ионизирующих и ЭМИ излучений***

Методы предотвращения нарушений работоспособности схем из-за воздействия ионизирующих излучений сводятся к следующим:

*От временных эффектов:*

- к компенсации протекающих токов;
- защите от протекания избыточных токов;
- защите от перенапряжений;
- мерам по ускорению восстановления схемы в исходное состояние;
- сохранению основных данных в стойкой памяти;
- предотвращению потери информации;
- предотвращению записи дискретных схем.

*От постоянных эффектов:*

- к выбору высокочастотных приборов;
- ограничению на применение МОП-транзисторов в среде с высоким уровнем дозы;
- разработке схем, допускающих большие отклонения параметров элементов;
- минимизации чувствительности схем;
- изменению параметров ЭРЭ.

Например, применение оптоэлектронных устройств для построения линии радиосвязи.

*Методы защиты ЭС от ЭМИ сводятся к конструкционным, структурно-функциональным и схемотехническим.*

Конструкционные методы состоят в улучшении экранирования кабелей и аппаратуры, естественно при этом, что наиболее уязвимыми при воздействии ЭМИ оказываются элементы ЭС, непосредственно подсоединяемые к кабелям и проводам. Наводки в неэкранированных внешних кабелях могут быть очень большими при большой крутизне фронта.

Экранирование является наиболее радикальным и, можно сказать, единственным эффективным способом защиты проводных линий связи.

При экранировании необходимо соблюдать все основные требования, определяющие эффективность экрана (заземление экрана оболочки в начале и конце линий). Помимо экранирования для уменьшения амплитуды напряжения наводки следует выполнять эти связи с помощью симметричных линий.

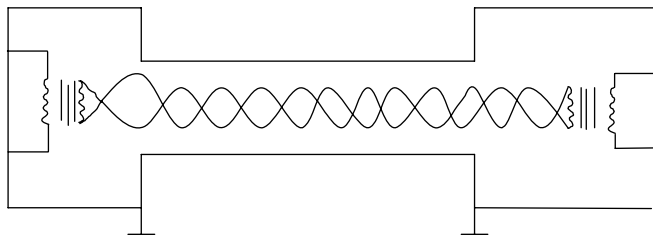


Рис. 10.36. Защита линии симметрированием

Симметрирование заключается в скручивании с определенным шагом проводов линий для выравнивания параметров каждого из них по отношению к земле или экрану кабеля (рис. 10.36).

Для гальванического разделения цепей вход-выход устройств ЭС могут быть использованы трансформаторы, датчики Холла и т. п.

Для исключения перенапряжений в линиях связи на их нагрузке используют схемотехнические методы:

- применение разрядников,
- применение фильтров в линиях связи (рис. 10.37).

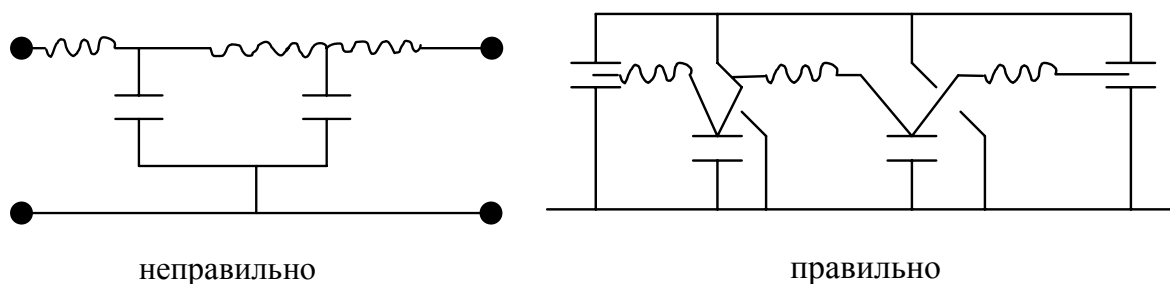


Рис. 10.37. Защита линии с помощью фильтров

## 10.9. Основы автоматизации выбора способов электромагнитной защиты ЭС

Задача выбора способов электромагнитной защиты (ЭМЗ) ЭС относится к классу трудноформализуемых задач, поэтому для ее решения целесообразно использовать методологию, применяемую для раз-

работки баз знаний экспертных систем аналогично теплозащите ЭС (см. подразд. 7.5).

Анализ и систематизация причин сбоев и неустойчивой работы ЭС, имеющих электромагнитную природу, приводит к следующим группам причин сбоев:

1. Помехи (внутренние и внешние), распространяющиеся через пространство.

2. Помехи, проходящие по цепям питания.

3. Помехи, проходящие по сигнальным проводникам.

4. Искажения сигналов, обусловленные собственными *RLC*-параметрами электро монтажа и элементов.

Соответственно задача выбора способов ЭМЗ распадается на четыре подзадачи.

Для решения 1-й подзадачи первый способ уменьшения помех, проходящих через пространство, – это пространственное разнесение источников и приемников помех (ИПП), если это возможно. Затем разработчик ЭС рассчитывает (или моделирует с применением программ посттопологического анализа ЭС), затухает ли наведенный электромагнитный сигнал до приемлемой величины. Если результаты окажутся неудовлетворительными, то следует применить экранирование ИПП.

Вид экрана зависит от вида связи между ИПП.

Если поле электрическое, то следует применить электростатический экран.

Если поле магнитное медленноменяющееся, то следует применить магнитный низкочастотный экран.

Если поле магнитное быстроменяющееся, то следует применять магнитный высокочастотный экран.

Если поле электромагнитное, то и экран следует применить электромагнитный.

Выбор способа уменьшения помех, проходящих по цепям питания (СУПЦП), можно представить как выбор на графе решения пути от корневой вершины к терминальным вершинам графа (рис. 10.38), где Отсут. – отсутствует;

УвШП – увеличение ширины печатного проводника;

УмДП – уменьшение длины проводника;

ПРПЦП – параллельное исполнение разнополярных печатных цепей питания;

ПОПЦП – параллельное исполнение однополярных печатных цепей питания;

НШП – выполнение цепей питания в виде навесных шин;

ФЦП – установка фильтров в цепях питания;

ОЗИПП – отдельная запитка ИПП.

На графе решения сплошными кружками показаны вершины, инцидентные дочерним И-вершинам, т. е. тем вершинам, которые соответствуют дополняющим друг друга способам уменьшения помех СУПЦП.

Например, одно из проекционных правил имеет вид:

ЕСЛИ цепи питания общие для ИПП = Есть &

Отдельная запитка ИПП = Невозможна &

Плотность монтажа = Высокая &

Фильтры в СхЭПр = Не предусмотрены,

ТО СУПЦП = ФЦП & НШП.

Таким образом, рекомендуется для конструктора ЭС установить фильтры в цепях питания и выполнить цепи питания в виде навесных шин, причем, возможно, окажется достаточным применение только одного из рекомендованных методов.

Заметим, что если в СхЭПр предусмотрена установка фильтров в цепях питания, то конструктор обязан исполнить это указание, и поэтому оно не отражено в графе решения.

Выбор способов уменьшения помех, проходящих по сигнальным проводникам (СУПСП) может быть представлен в виде графа решения (рис. 10.39), где атрибут СУПСП (терминальные вершины) может принимать следующие значения:

Отсут – отсутствует;

ЭкСл – экранирующие слои в МПП;

УмДП – уменьшение длины проводников;

УмШП – уменьшение ширины проводников;

УвЗа – увеличение зазора между проводниками;

НепП – обеспечение непараллельного исполнения проводников;

Фильтр – установка фильтров в общих сигнальных проводниках ИПП;

ЭкПр – экранирование проводников.

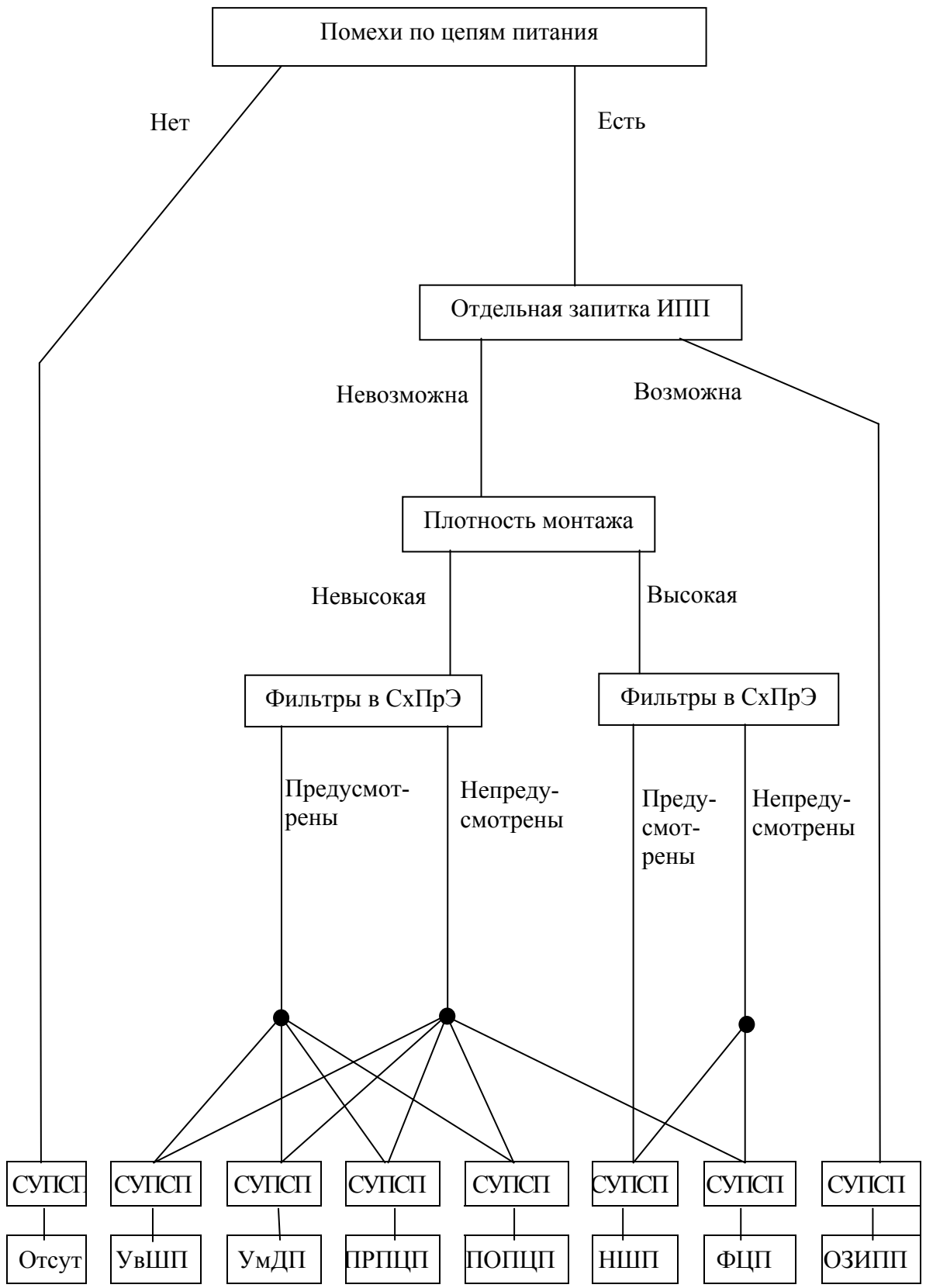


Рис. 10.38. Граф принятия решений БЗ «Выбор способов уменьшения помех, проходящих по цепям питания»

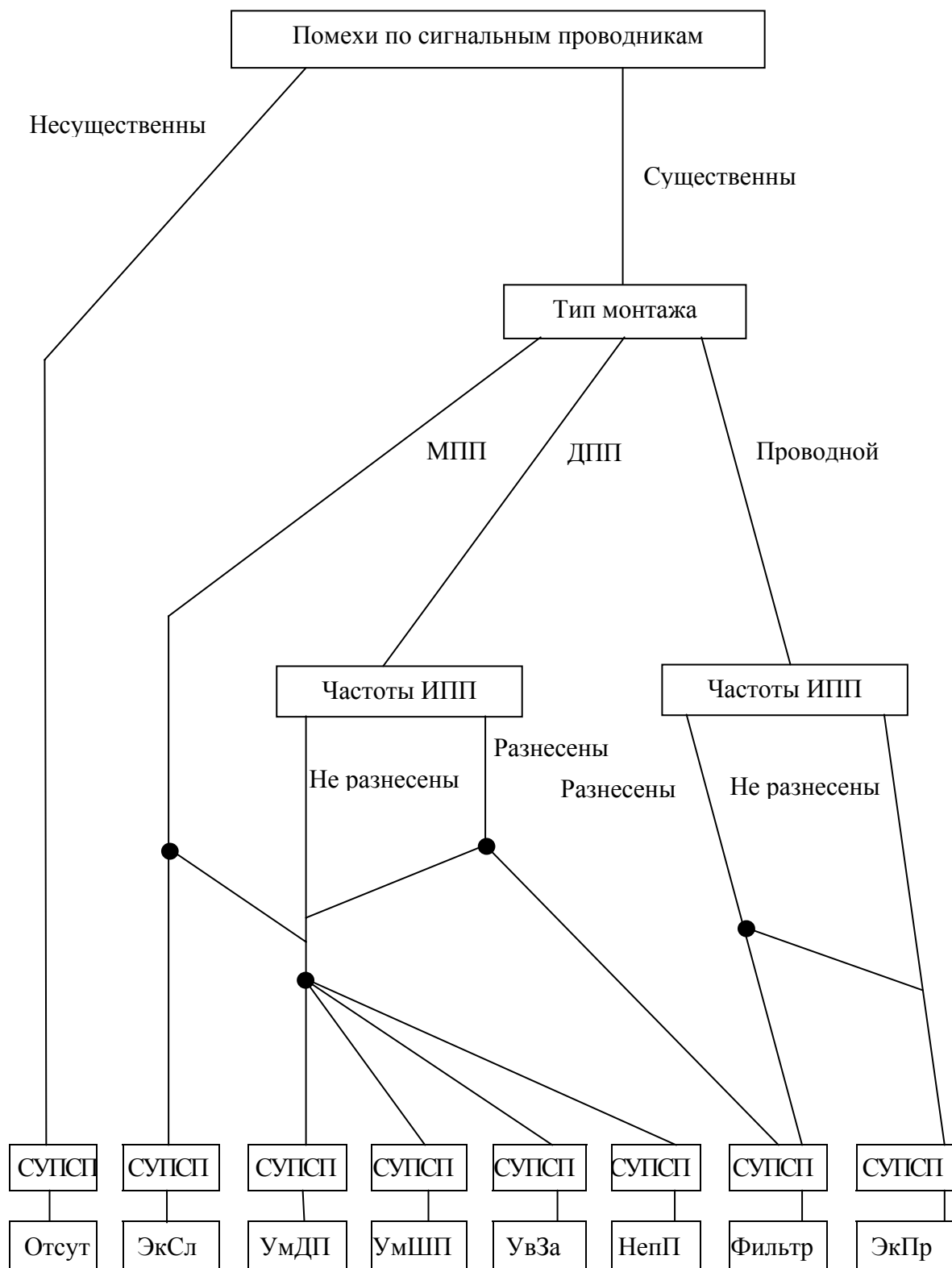


Рис. 10.39. Граф принятия решений БЗ «Выбор способов уменьшения помех, проходящих по сигнальным проводникам»

Для уменьшения искажения сигналов, обусловленных собственными  $RLC$ -параметрами, применяют уменьшение длины линий, непараллельное исполнение линий, увеличение зазора между линиями. Если линия оказывается электрически длинной, то выполняют согласование волнового сопротивления линии с нагрузкой.

### Контрольные вопросы

1. Назовите источники и приемники помех ЭС и виды паразитных связей.
2. Условия возникновения электрического, магнитного и электромагнитного полей.
3. Принципы действия и конструкции электростатических экранов.
4. Магнитные и электромагнитные экраны. Их принципы действия и разновидности конструкций.
5. От чего зависит эффективность электромагнитного экрана? Как ее обеспечить на различных частотах с минимальной толщиной стенок экрана?
6. Нарисуйте эквивалентную схему паразитной связи между элементами в секционированном корпусе-экране ЭС и объясните предполагаемые методы уменьшения паразитной связи.
7. Почему многослойный экран эффективнее однослойного экрана, толщина стенок которого равна сумме толщин экранирующих слоев многослойного экрана?
8. За счет чего обеспечивается эффективность экранирования проводов в ЭС?
9. Достоинства и недостатки экранирования катушек индуктивности и контуров, рекомендации конструкторских решений электромагнитных экранов для этих элементов.
10. Какие паразитные параметры и связи печатного и навесного монтажа имеют место в ЭС?
11. Как уменьшить время задержки сигнала и его искажение в линии связи?
12. Как оценить коэффициенты передачи помехи с провода на провод при емкостной и взаимоиндуктивной связи? Конструктивные методы уменьшения этих связей.
13. Кондуктивные паразитные связи между модулями ЭС через цепи питания, основные рекомендации по исполнению цепей питания в ячейках и между ячейками ЭС.

14. Устойчивость усилителей ЭС, рекомендации по исполнению печатного монтажа, их входных и выходных цепей, а также компоновки многокаскадных усилителей.

15. Фильтрация напряжений помехи в проводах, принципы построения фильтров.

16. Разновидности конструкций фильтров и основные требования к их компоновке.

17. Основные виды ионизирующих излучений и их влияние на ЭС.

18. Методы защиты ЭС от ионизирующих излучений.

## 11. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭС ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### 11.1. Особенности условий эксплуатации и проектирования самолетной аппаратуры

При проектировании ЭС различного назначения используют системный подход, когда максимально учитываются все факторы влияния. Проектируемая ЭС и объект назначения представляют в виде системной иерархии (рис. 11.1).

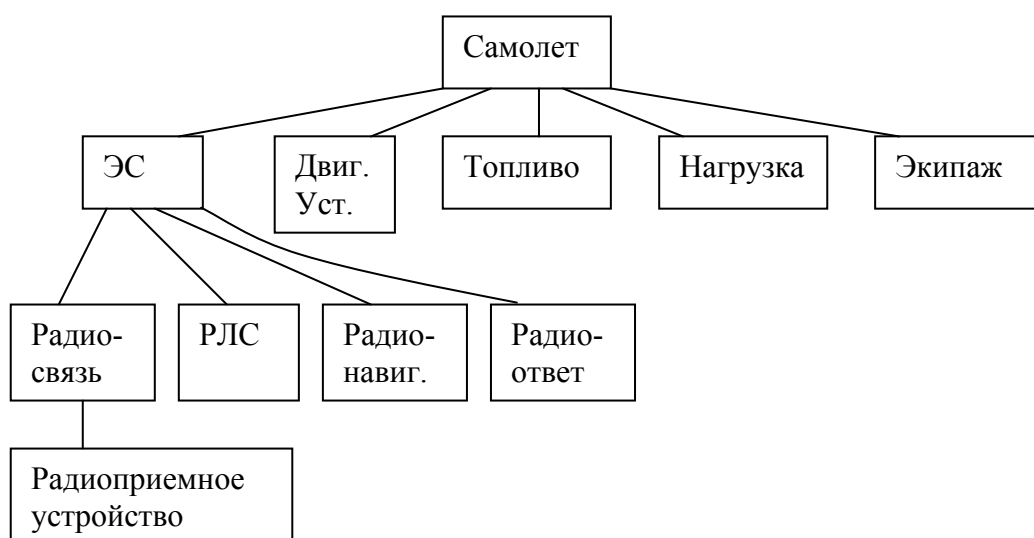


Рис. 11.1. Системная иерархия ЭС и объекта назначения



Предлагаемая система позволяет выделить группу внешних и внутренних параметров аппаратуры. Внешние параметры заданы извне от составляющих высших уровней и являются исходными данными на разработку. Составляющие высших уровней определяют требования по климатическим и механическим условиям эксплуатации, ограничения на габаритные размеры и массу конструкции, определяют требования по надёжности аппаратуры.

Группа внутренних параметров характеризует проектируемую аппаратуру с точки зрения её материальных и функциональных параметров, которые и определяют наилучшие показатели качества. Соответственно внутренние параметры конструкции должны обеспечить электромагнитную совместимость проектируемой аппаратуры (надёжность, минимальные габаритные размеры и массу, удобство эксплуатации и эргономику конструкции), безопасность эксплуатации, защищённость конструкции в сложных условиях эксплуатации, ремонтпригодность конструкции, её технологичность.

Самолётная аппаратура работает в сложных климатических условиях. Самолёт должен работать во всех климатических зонах земного шара. Соответственно самолётная аппаратура должна быть морозоустойчива. При полёте на высоте температура воздуха составляет  $-50 \dots -60$  °С, поэтому самолётная аппаратура должна быть морозоустойчива при температуре минус  $-60$  °С. Поэтому при проектировании необходимо выбрать радиоэлементы и радиоматериалы, морозоустойчивые при указанных температурах.

Не все демпфирующие и эластичные материалы допускают указанную температуру. Многие из них увеличивают жёсткость и теряют демпфирующие и герметизирующие свойства. ЭРЭ (например электролитические конденсаторы) должны быть из разряда морозоустойчивых.

При изменении температуры от  $-50$  до  $+50$  °С имеет место изменение параметров ЭРЭ, так как элементы имеют температурные коэффициенты ёмкости, индуктивности, сопротивления и т. д.; это приведёт к изменению параметров ЭС (например к изменению частоты передатчиков). Поэтому при проектировании необходимо обеспечить высокую температурную стабильность тех узлов аппаратуры, которые определяют надёжность ЭС по постоянным отказам. Например, высокая стабильность частоты.

Предлагают выбирать и проектировать ЭРЭ и узлы с малыми температурными коэффициентами, т. е. с высокой параметрической стабильностью.

Применяют контуры высокой добротности и параметрической стабильности, например кварцевые резонаторы. Применяют также термостатирование кварца либо задающего генератора в целом.

Самолёт может эксплуатироваться в южных районах земного шара, когда  $T_{\max} = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поэтому для самолётной аппаратуры задаются условия теплоустойчивости  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (теплопрочности  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). При испытаниях на теплопрочность аппаратуру выдерживают при  $T = +80\text{ }^{\circ}\text{C}$  четыре часа, затем медленно снижают температуру до нормальной и проверяют её работоспособность.

При проектировании аппаратуры, когда основными требованиями являются минимальные габаритные размеры и масса, возникает проблема охлаждения аппаратуры, обусловленная высокой удельной мощностью тепловых потерь и отсутствием естественного конвективного охлаждения при эксплуатации на высоте. Дело в том, что на высоте падает атмосферное давление.

При полётах на высоте свыше 20 км конвективное охлаждение аппаратуры практически отсутствует (рис. 11.2). Поэтому для интенсификации естественного охлаждения предлагают:

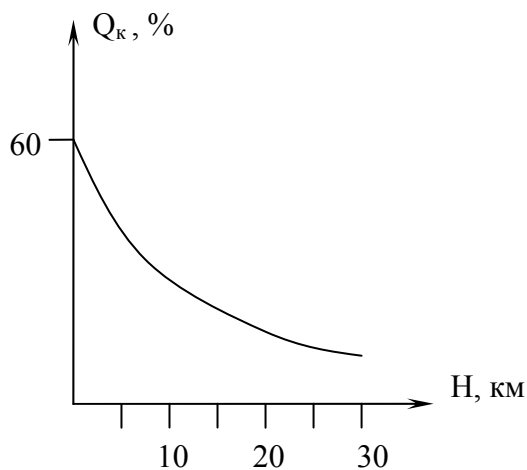


Рис. 11.2. Зависимость эффективности конвективного охлаждения от высоты

сификации естественного охлаждения предлагают:

– улучшать условия охлаждения излучением, увеличивая площадь конструкции, например ребрением, и окрашивая поверхность аппаратуры и несущих в чёрный цвет.

– усиливать теплопроводное (кондуктивное) охлаждение мощных элементов путем применения теплоотводящих шин или теплоотводящих оснований для мощных микросхем конструкции.

Если естественного охлаждения не достаточно, то предлагают принудительную вентиляцию. Вентилятор обеспечивает движение воздуха или инертного газа, которые закачивают в герметичный кожух через штуцер передней панели устройства.

Также применяют принудительную вентиляцию холодным забортным воздухом, нагнетаемым турбинным самолётом через воздуховоды ячеек блоков ЭС.

Самолётная аппаратура должна эксплуатироваться при пониженных атмосферных давлениях:

$p = 90$  мм рт. ст. для транспортных,

$p = 5$  мм рт. ст. – для скоростных высотных самолетов.

При пониженных атмосферных давлениях герметичные корпуса аппаратуры испытывают деформацию за счёт перепада давления внутри и вне корпуса. При проектировании необходимо выбирать материал корпуса и толщину стенок, исходя из допустимой величины деформации.

При пониженном атмосферном давлении ухудшаются условия охлаждения, электропрочность воздуха и воздушных зазоров. Поэтому при проектировании необходимо рассчитывать пробивное напряжение воздушных зазоров и обеспечивать электропрочность (см. рис. 10.31, п. 10.6).

### ***Особенности проектирования самолётных ЭС***

Самолётная аппаратура должна работать во всех климатических зонах земного шара, в том числе и тропической зоне. В этом случае к ЭС предъявляются высокие требования по влагоустойчивости (влажность 98 % при температуре 40 °С).

Поэтому при проектировании ЭС применяют негигроскопичные диэлектрические материалы (стеклотекстолит, керамику). Элементы и узлы с гигроскопичными материалами с точными изделиями защищают от влаги покрытиями, пропиткой, заливкой. Металлические несущие конструкции защищают металлическими и неметаллическими покрытиями.

Для того чтобы исключить контактную коррозию металла, исключают контактирование металлов с большой разницей электрохимических потенциалов. Не допускается контакт алюминия и меди.

Конструкции на бескорпусной элементной базе должны выполняться с общей герметизацией в герметичном корпусе блока и устройства. Для надёжности герметизации внутри герметичного корпуса устройства можно создавать избыточные давления, закачивая через штуцер на корпусе инертный газ.

### *Механические воздействия и особенности виброударозащиты самолётной аппаратуры*

Самолётная аппаратура работает в сложных условиях ударов и вибраций, возникающих при полёте от работы двигателей, при посадке самолёта.

Самолётная аппаратура испытывает вибрации в диапазоне частот  $f = 3 \dots 2000$  Гц с ускорениями  $I = 2 \dots 10g$  и удары при посадке самолёта с ускорением, равным  $I = 10g$  (для лёгких),  $I = 5g$  (для транспортных самолётов).

Кроме того, имеет место ускорение постоянного направления – центробежное, при изменении курса полёта самолёта:

$$I = 9g \text{ – для лёгких,}$$
$$I = 6g \text{ – для транспортных.}$$

Указанные ускорения вызывают силы перегрузки  $F = M \cdot I$  на элементы конструкции и на аппаратуру в целом, где  $M$  – масса.

Следовательно, исходя из значений перегрузки, выбирают запас прочности по элементам конструкции крепления элементов конструкции и запас на силу перегрузки на элемент крепления.

Всякое разъёмное соединение должно иметь контровку от самоотворачивания. Метод контровки выбирают в зависимости от диаметра винтов или болтов соединения.

Для контровки соединений малых диаметров предлагают закрашивание головки винта или гайки краской. Предлагают контровочные шайбы под гайки соединения. Шайбы бывают разрезные и коробчатые.

Если в конструкции рядом расположены несколько соединений, то можно применить контровку проволокой.

Для соединения больших диаметров (силовые крепления) применяют шплинтование, когда гайка и болт стопорятся через сквозное отверстие шплинтом.

Постоянно действующие ускорения могут оторвать или разрушить элементы конструкции, могут вызвать ложные срабатывания электромеханических устройств, переключающих устройств, поэтому при проектировании необходимо выбирать переключающие и магнитные устройства с усилиями переключения бóльшими, чем возникающие силы перегрузки.

С тем чтобы исключить резонанс элементов конструкции, необходимо, чтобы собственная частота их была больше 2000 Гц как минимум в 2 раза. Получить такие собственные частоты колебаний элементов конструкции без значительного увеличения массы в большинстве случаев не удастся. Поэтому основным методом виброзащиты самолетных ЭС является демпфирование.

При конструировании рекомендуется применять малогабаритные элементы конструкции малой массы, что приводит к увеличению частоты собственных колебаний этих элементов.

Конструкции ячеек исполняют каркасными, т. е. рамочными с дополнительным креплением в центральной зоне платы, поэтому предлагают рамки с поперечными, продольными рёбрами жёсткости (и теплоотводящие). В теплонагруженных конструкциях ячеек широко применяют теплоотводящее основание ячеек.

Если в конструкции на верхних частотах вибрации резонанс устранить не удаётся, то предлагают виброизоляцию элементов и блока устройства в целом (рис. 11.3).

Виброизоляцию ячеек выполняют установкой микросхем и микросборок на эластичный клей и компаунды приклеиванием платы к несущей рамке таким клеем или компаундом. Кроме этого используют заливку конструкции ячейки пенополиуретанами.

Для виброизоляции устройства в целом предлагают виброизоляторы (амортизаторы) под устройства или под виброизоляционную раму для группы устройств.

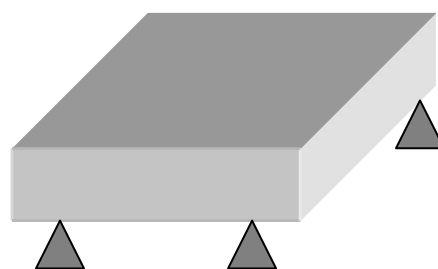
При выборе виброизоляторов под устройства необходимо учитывать наличие ударов и вибрации, а также климатические условия эксплуатации аппаратуры.

### ***Особенности компоновки самолётной аппаратуры***

Так как на самолёте много аппаратуры различного функционального назначения, а обслуживается она штурманом или лётчиком, то очевидно, что аппаратура должна быть централизованного управления.

Следовательно, самолётная аппаратура при компоновке исполняется в виде следующих конструктивно обособленных составляющих:

1. Пульт управления.



*Рис. 11.3. Блок ЭС на виброизоляторах*

2. Блоки основной аппаратуры.
3. Антенные устройства.
4. Кабели и согласующие устройства, разъёмы.
5. Блоки обработки информации (бортовые ЭВМ).

Место, отведённое под пульт управления, ограничено по площади  $S_{\max} = 0,5 \text{ м}^2$ .

Поэтому на пульте должны размещаться компактные, но информативные устройства отображения информации и устройства контроля.

На приборах отображения информации рекомендуется наличие не только количественной, но и качественной оценки. В настоящее время в качестве устройств отображения информации широко используют лучевые трубки (мониторы). Представить информацию на дисплей от устройств различного функционального содержания можно при предварительной обработке информации в бортовых компьютерных устройствах.

Устройства управления простейшие, и процесс управления сводится к нажатию кнопок, к переключению тумблеров. Соответственно все передающие и приёмные устройства построены по принципу фиксированной частоты по нескольким каналам связи.

В приёмных и передающих устройствах обеспечивают высокую стабильность частоты по каналам связи за счёт применения высокодобротных, высокостабильных кварцевых резонаторов. Устройства самолётной аппаратуры выполняют компактными и миниатюрными на корпусированных БИС или бескорпусных микросборках.

Устройства малой массы и малых габаритных размеров не могут персонально защищаться от ударов и вибраций виброизоляторами, так как слишком мала масса нагрузки. Поэтому предлагают крепление нескольких устройств на одну амортизированную раму.

Конструкции выполняют легкосъёмными, так как аппаратура должна проходить регламентные работы через каждые 25 часов полёта. Широко применяются крепления с замками-защёлками невыпадающими винтами. На самолёте применяют много антенн на различный диапазон длин волн, некоторые антенны направленные, крупногабаритные например рамочные антенны. Крупногабаритные антенны направленной диаграммы должны быть утоплены в фюзеляже само-

лётта и закрыты радиопрозрачными люками, в качестве которых можно использовать люки из оргстекла. Следует иметь в виду, что при полётах на сверхзвуковых скоростях обшивка самолёта и люки могут нагреваться до температуры 150...200 °С.

### *Этап внешнего проектирования, обоснование исходных данных на разработку*

Для обоснования исходных данных для разработки ЭС самолётной аппаратуры необходимо анализировать параметры и характеристики системы высшего уровня, т. е. лётно-технические характеристики. Пусть в исходных данных на разработку задана масса ЭС ( $m_{эс}$ ). Соответственно необходимо анализировать массу ЭС на самолёте во взаимосвязи с массами других структурных составляющих.

$$m_1 = m_{эс} + m_{дв} + m_T + m_H + m_{пл}.$$

Запишем выражение в относительных единицах.

$$1 = \mu_{эс} + \mu_{дв} + \mu_T + \mu_H + \mu_{пл}.$$

Например, для скоростного самолёта:  $\mu_{эс} = 0,1$ ,  $\mu_{дв} = 0,4$ ,  $\mu_T = 0,1$ ,  $\mu_H = 0,1$ ,  $\mu_{пл} = 0,3$ .

Чтобы обоснованно определить требуемую массу ЭС, необходимо рассматривать её взаимосвязь с дальностью и скоростью полёта.

Дальность  $L = C_L \mu_t$ ;

$C_L$  – коэффициент пропорциональности;

Скорость  $V = C_V \sqrt[3]{\mu_{ду}}$ .

Подставим в записанное уравнение значение массы и топлива

$$1 = \mu_{эс} + \mu_H + \mu_{пл} + L/C_L + V^3/C_v^3.$$

Записанное уравнение позволяет не только обоснованно выбрать массу проектируемой аппаратуры, но и оценить полученный выигрыш от оптимизации по массе в лётно-технических характеристиках самолёта.

Например, если сделать аппаратуру ЭС лучше, уменьшив массу в 10 раз, то самолет может взять больше топлива. При этом увеличивается дальность полета.

## 11.2. Особенности условий эксплуатации и проектирования корабельной аппаратуры

На современных судах размещают аппаратуру радиосвязи, радиолокации (РЛС), радионавигации.

Следовательно, имеет место проблема электромагнитной совместимости. На корабле не рекомендуется размещать РЛС. Станцию размещают в отдельной хорошо экранированной рубке. Чтобы исключить связь источников и приёмников помех, РЛС питается от отдельного агрегата питания.

Судовая аппаратура имеет различные условия и соответственно различные подгруппы по климатическим условиям эксплуатации. Для аппаратуры внутренних помещений – кают корабля-требуется теплоустойчивость при температуре +50 °С.

Следовательно, необходимо рассчитывать температурный режим на температуру +50 °С. Эта аппаратура испытывает отрицательные температуры –10...–40 °С и повышенную влажность 93 % при температуре +40 °С.

Необходимо предлагать методы влагозащиты элементов устройства и несущих конструкций. Следует иметь в виду, что морская влажность содержит соли, к которым неустойчивы многие антикоррозионные покрытия. Для защиты металлических конструкций следует использовать покрытия, устойчивые к морской влаге, например кадмирование.

Аппаратура верхней палубы корабля подвергается водо- и брызговоздействию и должна быть водо- и брызгозащищённой (интенсивность брызг 5 мм/мин). Следовательно, аппаратура верхней палубы должна быть герметизирована. Судовая аппаратура испытывает вибрации. Вибрации частотой  $f = 10 \dots 30$  Гц с ускорением  $I = 1,5g$  возникают от работы двигателей и соударения о волны. Для быстроходных катеров частота вибраций может достигать  $f_{max} = 20$  Гц и ускорение  $I = 6g$ . Следовательно, выбирать виброизоляторы для защиты от вибрации нет смысла. Поэтому виброизоляторы выбирают из условий ударных нагрузок и защиты от них.

При выборе виброизоляторов следует иметь в виду, что корабль имеет крены с борта на борт 45 ° и деференты с кормы на нос 7 °, а



поэтому виброизоляторы должны быть жёсткими не только по вертикали, но и в горизонтальном направлении. Для корабельной аппаратуры широко применяются виброизоляторы АКСС (амортизатор корабельный стальной со страховкой). Страховка обеспечивает механические крепления в случае пробоя демпфирующего элемента виброизолятора.

### **11.3. Особенности условий эксплуатации автомобильной аппаратуры**

Современный автомобиль может эксплуатироваться во всех временных зонах земного шара, поэтому аппаратура должна быть теплоустойчива при температуре  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и морозоустойчива при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Относительная влажность 93 % при температуре  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Автомобильная аппаратура должна эксплуатироваться при пониженном атмосферном давлении (500 мм рт. ст.). При пониженном атмосферном давлении падает электропрочность воздуха, и поэтому необходимо рассчитывать электрическую прочность и пробивное напряжение высоковольтных устройств.

Автомобильная аппаратура испытывает вибрации и удары  $f = 10 \dots 70$  Гц,  $I = 1 \dots 4g$ . Кроме того, аппаратура должна быть ударопрочной при ударах с ускорением  $15g$ . Следовательно, при виброударозащите необходимо прежде всего использовать методы частотной отстройки.

Собственная частота проектируемых элементов конструкции должна быть больше верхней частоты вибрации в  $1,5 \dots 2$  раза (140 Гц и более).

Для ударозащиты предлагают запас прочности элементов, крепление электрорадиоэлементов. При выборе виброизоляторов необходимо исходить из условий их жёсткости и необходимости демпфирования.

Широко применяют виброизоляторы фрикционного и гистерезисного демпфирования. Резинометаллические виброизоляторы АП, АЧ достаточно жёсткие, простые по конструкции и работают при температуре от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 11.4. Особенности условий эксплуатации и проектирования носимой аппаратуры

Носимая аппаратура должна допускать эксплуатацию на открытом воздухе в движении оператора. Соответственно аппаратура должна быть теплоустойчива при температуре +50 °С и морозоустойчива при температуре –50 °С.

Следует иметь в виду, что оператор должен эксплуатировать аппаратуру в указанном диапазоне температур в спецодежде, а значит, управление аппаратурой должно быть простым и сводиться к нажатию кнопок, к переключению тумблеров. Аппаратура должна эксплуатироваться в условиях повышенной влажности 93 % при температуре +25 °С, следовательно, быть влагозащищённой и, кроме того, водозащищённой (слой воды 50 см), брызгозащищённой (интенсивность брызг 5 мм/мин).

Таким образом, носимая аппаратура должна проектироваться в герметичном исполнении либо в корпусах с герметизацией и допускать перевозку транспортом без упаковочной тары, а поэтому должна быть вибропрочна в диапазоне частот  $f = 10 \dots 70$  Гц с ускорением  $I = 1 \dots 4g$ .

Носимая аппаратура должна быть ударопрочная при падении аппарата с высоты 750 мм. Сила перегрузки на аппарат при падении с высоты рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{ср}} = M \cdot a = M \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}_2}{\tau_U},$$

где  $M$  – масса аппарата;

$a$  – ускорение, которые испытывает аппарат при ударе о грунт;

$v_1$  – начальная скорость при ударе, т. е. скорость, до которой разогнался аппарат, падая с высоты  $h$ :  $v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ ;

$v_2$  – конечная скорость удара аппарата о грунт, зависит от упругих свойств соударяемых тел  $v_2 = v_1 \cdot k$ ,  $k$  – коэффициент, определяющий возможности отскока аппарата (при падении на сухой грунт  $k = 0,65$ );

$\tau_U$  – время удара аппарата о грунт, т. е. время на изменение скоростей.  $\tau_U$  зависит от того, как и чем упадёт аппарат, может иметь значение  $0,01 \dots 0,001$  с.

Соответственно при падении аппарата на сухой грунт сила перегрузки на аппарат  $Q_{\text{ср}}$  может достигать значений перегрузки  $I = 100g \dots 120g$ .

Следовательно, носимая аппаратура должна исполняться в ударопрочных корпусах с запасом прочности по креплению элементов.

## 11.5. Особенности проектирования ЭС различного функционального назначения

### *Автогенераторы, стабильность частоты и методы стабилизации*

Автогенераторы широко применяются в радиопередающих, радиоприёмных, телевизионных и прочих устройствах ЭС. Всякий автогенератор (рис 11.4) состоит из активного элемента (например транзистора), контура, цепочки обратной связи.

Для того чтобы автогенератор работал в режиме генерации, в кольце автогенерации должны выполняться условия баланса амплитуд и баланса фаз. *Баланс амплитуд* задается условием

$$K_{\text{о.с}} \cdot K_{\text{а.э}} \geq 1,$$

где  $K_{\text{а.э}}$  – коэффициент усиления активного элемента;

$K_{\text{о.с}}$  – коэффициент усиления цепи обратной связи.

Для *баланса фаз* необходимо, чтобы сумма фазовых сдвигов по цепочке автогенерации была кратна  $2\pi$ . Так как контур на различных частотах имеет комплексное сопротивление, то он вызывает фазовый сдвиг сигнала на выходе относительно входа  $\varphi_{Z_{\text{Э}}}$ . Цепочка обратной связи обеспечивает фазовый сдвиг сигнала  $\varphi_{\text{о.с}}$ . Активный элемент сдвигает фазу сигнала на  $\pi$ . Поэтому баланс фаз запишется

$$\pi + \varphi_{Z_{\text{Э}}} + \varphi_{\text{о.с}} = 2\pi n,$$

где  $n$  – натуральное число.

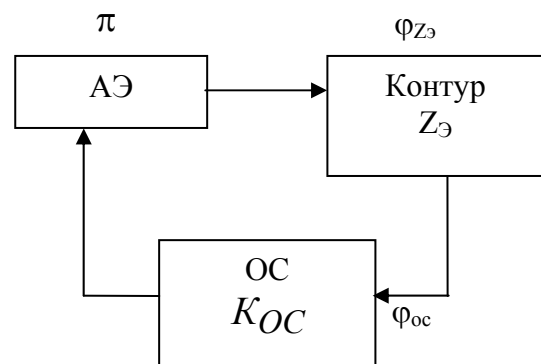


Рис. 11.4. Схема автогенератора

К автогенераторам предъявляется одно из основных требований – стабильность частоты.

В радиопередающих устройствах стабильность частоты определяет задающий автогенератор. Для радиопередающих устройств характеристика нестабильности частоты задаётся в ТЗ и должна быть не больше заданной

$$q = \frac{\Delta f}{f},$$

где  $q$  – коэффициент нестабильности частоты;

$\Delta f$  – возможное изменение частоты под действием дестабилизирующих факторов;

$f$  – рабочая несущая частота.

Для передатчиков служебной связи подвижных объектов частотой  $f \leq 100$  МГц  $q = (10 \dots 50) 10^{-6}$ .

**Дестабилизирующие факторы** могут быть внутренними и внешними. **Внешними дестабилизирующими факторами** для частоты автогенераторов являются:

1. Нестабильность температуры эксплуатации.
2. Механические воздействия эксплуатации.
3. Нестабильность влажности при эксплуатации.

Кроме того, причиной дестабилизации частоты могут быть **внутренние факторы**, определяемые нестабильностью параметров элементов схемы:

1. «Выбег» частоты, т. е. изменение частоты в начальный момент времени после включения генератора за счет изменения межэлектродных емкостей активных элементов до наступления установившегося режима работы.

2. Реакция нагрузки, т. е. влияние входного сопротивления следующего за автогенератором каскада (например усилителя или умножителя частоты), которое изменяется за счет нестабильности режимов работы, и в том числе при их перестройке.

3. Нестабильность питающих напряжений, которая вызывает изменение режимов работы структурных составляющих ЭС и условий автогенерации генератора. Для высокостабильных радиопередающих

устройств нестабильность питающих напряжений должна быть не более  $\pm 2\%$ .

Для борьбы с выбегом частоты в прецизионных точных измерительных приборах рекомендуется включение автогенератора за час до работы прибора. Выбег частоты можно уменьшить также при неполном включении активного элемента к контуру, например в схеме емкостной трехточки к одному из конденсаторов емкостного плеча. Уменьшить влияние нагрузки можно неполным подключением следующего каскада к контуру автогенератора.

### ***Влияние дестабилизирующих факторов и методы стабилизации частоты автогенераторов***

Частота автогенератора определяется резонансной частотой контура (рис. 11.5).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi} L^{-\frac{1}{2}} C^{-\frac{1}{2}}.$$

Частота автогенерации при эксплуатации будет изменяться, так как при изменении климатических и механических воздействий будут изменяться индуктивность и ёмкость контура.

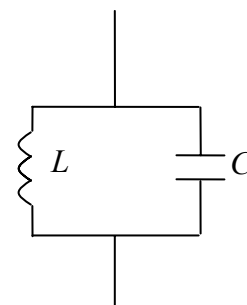
Изменение частоты при изменении индуктивности и ёмкости можно рассчитать, используя методы теории точности:

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial f}{\partial C} \Delta C = \frac{1}{2\pi} C^{-\frac{1}{2}} \left(-\frac{1}{2}\right) L^{-\frac{3}{2}} \Delta L + \frac{1}{2\pi} L^{-\frac{1}{2}} \left(-\frac{1}{2}\right) C^{-\frac{3}{2}} \Delta C.$$

Относительное изменение частоты

$$\frac{\Delta f}{f} = \left(-\frac{1}{2}\right) \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C}\right).$$

Индуктивность и ёмкость контура будут изменяться при эксплуатации, прежде всего при изменении температуры, так как имеют температурный коэффициент индуктивности (ТКИ) и температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ).



*Рис. 11.5. Схема колебательного контура*

$$\text{ТКИ} = \alpha_L = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta t},$$

$$\text{ТКЕ} = \alpha_C = \frac{\Delta C}{C \cdot \Delta t},$$

где  $\Delta t$  – изменение температуры;

$\Delta L$ ,  $\Delta C$  – изменение индуктивности при этом изменении температуры соответственно.

Тогда температурный коэффициент частоты

$$\alpha_f = -\frac{1}{2}(\alpha_L + \alpha_C),$$

где  $\alpha_f = \frac{\Delta f}{f \cdot \Delta t}$ .

Для стабилизации частоты автогенератора под действием внешних факторов применяют следующие методы.

Уменьшают изменение параметров элементов генератора (например  $\Delta L$  и  $\Delta C$ ), т. е. применяют метод параметрической стабилизации. Для стандартных индуктивностей и ёмкостей контура предлагается их выбор с минимальными температурными коэффициентами  $\alpha_L$ ,  $\alpha_C$ .

Если предлагается конструкция высокостабильной катушки индуктивности, то рекомендуется:

- несущее основание из материала малого температурного коэффициента линейного расширения, не гигроскопичного. Например керамика;

- чтобы исключить геометрические изменения в обмотке катушки, рекомендуется наматывать катушку на керамическое основание предварительно нагретым горячим проводом с целью исключить сползание витков при эксплуатации.

Если катушка небольшого номинала однослойная, то можно намотку выполнить не проводом, а вжиганием меди в керамику.

Предложенные рекомендации позволяют получить катушки индуктивности с температурным коэффициентом  $\alpha_L = (5...30)10^{-6}$ . Тогда как в общем случае получают  $\alpha_L = (100...200)10^{-6}$ .

Можно обеспечить стабильность частоты автогенератора путем температурной компенсации изменений  $\Delta L$  и  $\Delta C$  за счёт разнозначности коэффициентов их влияния. Например, температурный коэффициент индуктивности  $\alpha_L$  имеет знак “плюс”, тогда необходимо предложить в контур конденсатор с отрицательным температурным коэффициентом  $\alpha_C$  (рис. 11.6).

$C_T$  – конденсатор термокомпенсирующий с отрицательным температурным коэффициентом.

Конденсатор термокомпенсирующий с отрицательным температурным коэффициентом – керамический, отличается цветом корпуса и маркировочной цветовой точкой на корпусе.

Для автогенераторов высокой стабильности, кроме параметрической стабилизации и термокомпенсации, применяется ещё метод термостатирования. При термостатировании контур или весь генератор помещается в термостат.

Автогенераторы с  $LC$ -контурами даже при использовании указанных трёх методов стабилизации приводит к нестабильности частоты

$$q = \frac{\Delta f}{f} = (5 \dots 10) 10^{-4}.$$

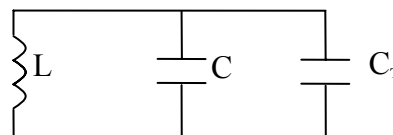
В то же время передатчики связи частотой до 100 МГц должны иметь  $q = (10 \dots 50) 10^{-6}$ .

Следовательно, для профессиональных передатчиков требуется нестабильность частоты на 1...2 порядка меньше, чем получается на  $LC$ -контурах. Поэтому для конструкции высокостабильных автогенераторов нужны другие контуры, которые должны удовлетворять определённым условиям стабилизации.

### ***Условия высокой стабилизации частоты автогенераторов***

Условия высокой стабилизации частоты можно вывести, анализируя условия автогенерации.

Согласно правилу баланса фаз сумма фазовых сдвигов сигнала на структурных составляющих автогенератора (см. рис. 11.4) по кольцу



*Рис. 11.6. Термостабилизация генератора*

автогенерации должна быть кратна  $2\pi$ . Для первой гармоники ( $n = 1$ ) условие баланса фаз выражается формулой

$$\pi + \varphi_{Z_{\text{э}}} + \varphi_{\text{о.с}} = 2\pi.$$

Относительно фазового сдвига сигнала на контуре для первой гармоники можно записать

$$\varphi_{Z_{\text{э}}} = \pi - \varphi_{\text{о.с}}.$$

Для случая резонансной системы автогенератора в виде  $LC$ -контур эквивалентное сопротивление  $Z_{\text{э}}$  контура имеет комплексный характер и зависит от частоты

$$Z_{\text{э}} = R_{\text{э}} + jX_{\text{э}},$$

где  $R_{\text{э}}$  – активное эквивалентное сопротивление контура;

$X_{\text{э}}$  – реактивное эквивалентное сопротивление контура;

$j$  – мнимая единица.

При наличии возмущающих воздействий, например температурных изменений при эксплуатации, изменяются сопротивление контура и цепочки обратной связи, а значит, изменяется фазовый сдвиг контура или цепочки обратной связи. В этом случае изменится частота, при которой будет выполняться условие баланса фаз при новых значениях фазовых сдвигов.

Рассмотрим условие, когда изменение частоты при новых фазовых сдвигах сигналов будет минимальным. Для  $LC$ -контура:

$$\operatorname{tg} \varphi_{Z_{\text{э}}} = \frac{X_{\text{э}}}{R_{\text{э}}} = -2 \frac{\Delta f}{f} Q,$$

где  $\frac{\Delta f}{f}$  – относительное изменение частоты автогенератора;

$Q$  – добротность контура.

В области малых расстроек контура от резонансной частоты  $\operatorname{tg} \varphi_{Z_{\text{э}}} \approx \varphi_{Z_{\text{э}}}$ . Следовательно,  $\varphi_{Z_{\text{э}}} = -2 \frac{\Delta f}{f} Q$ .



Фазовая характеристика контура (рис. 11.7) в области малых расстройек частоты относительно резонансной частоты представляет собой прямую линию, крутизна которой зависит от добротности. Чем выше добротность, тем выше крутизна фазовой характеристики.  $Q_2 > Q_1$ .

Предположим, что при температурном изменении изменились  $X$  и  $R$  параметры контура и появился фазовый сдвиг сигнала  $\varphi_{Z_3} = \varphi_T$ .

Указанному изменению фазового угла  $\varphi_{Z_3} = \varphi_T$  будет соответствовать изменение частоты автогенератора с одним контуром  $\Delta f_1$ , с другим контуром  $\Delta f_2$ . У контура с высокой добротностью  $Q_2$  изменение частоты автогенерации  $\Delta f_2$  будет гораздо меньше, чем у контура  $\Delta f_1$  с малой добротностью. Следовательно:

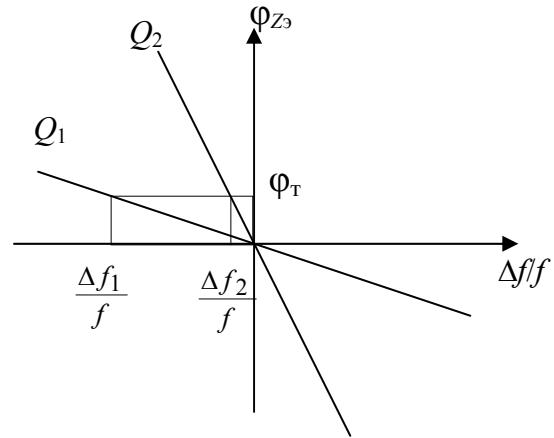


Рис. 11.7. Фазовая характеристика контура

1. Для того чтобы выполнять условие высокой стабильности частоты, необходимо выполнять условие высокой добротности контура автогенератора. Высокодобротным должен быть либо контур автогенератора, либо элемент обратной связи. Этому условию соответствует требование высокой крутизны фазовой характеристики.

2. Кроме указанного, контур и элемент обратной связи должны иметь высокую параметрическую стабильность, т. е. обладать эталонными свойствами.

Высокой добротностью и высокими эталонными свойствами обладают кварцевые резонаторы (кварц).

### **Кварцевые резонаторы и принципы стабилизации частоты**

Для кварцевых пластинок имеет место пьезоэффект: если к пластине из кварца подвести на её обкладки переменное напряжение, то пластинка будет деформироваться — растягиваться и сжиматься с частотой переменного напряжения (рис. 11.8). Кристалл кварца имеет шестигранник в сечении. Из кристалла могут быть вырезаны пластинки толщиной  $a$  и направлений среза  $x$  и  $y$  в зависимости от на-

правления относительно осей шестигранника. Пластины  $x$ -среза перпендикулярны оси  $x$ , проходящей через вершины шестигранника, а пластины  $y$ -среза перпендикулярны оси  $y$ , проходящей перпендикулярно граням как ось симметрии шестигранника.

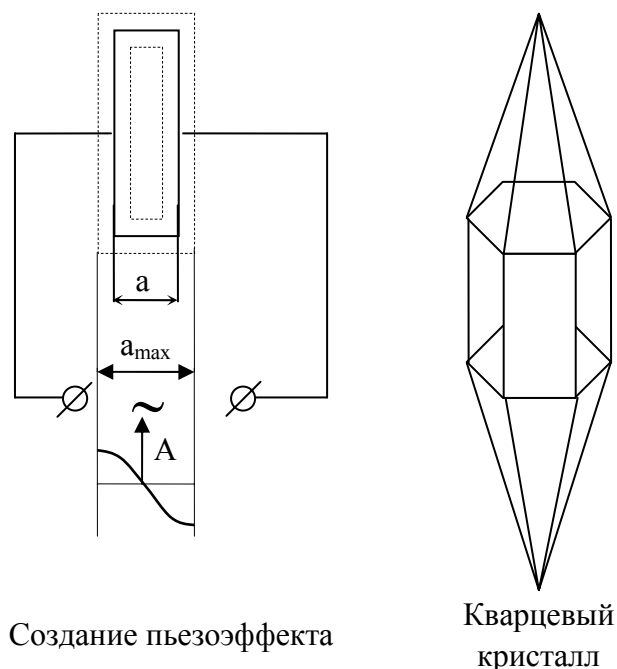


Рис. 11.8. Кварцевый резонатор

В зависимости от направления среза пластины имеет место разная скорость распространения механических колебаний в пластине. На рисунке штрихами показаны предельные значения амплитуд деформации пластины при растяжении и сжатии, когда приложено синусоидальное напряжение к обкладкам пластины. Если нарисовать график изменения амплитуд деформации по толщине пластины  $a$ , то получается, что по толщине пластины  $a$  укладывается половина волны механических колебаний, где  $A$  – амплитуда деформации. В таком случае длина волны механических колебаний

$$\lambda_{\text{мех}} = \frac{2a}{n},$$

где  $a$  – толщина кварцевой пластинки;

$\lambda_{\text{мех}}$  – длина волны механических колебаний пластинки;

$n$  – номер гармоники колебаний.

В зависимости от требований стабильности частоты автогенераторы могут исполняться в трех вариантах конструкторских решений:

1. Кварцевые автогенераторы общего применения. Эти автогенераторы имеют нестабильность частоты  $q = \frac{\Delta f}{f} = 10^{-4} \dots 10^{-5}$ . В этом автогенераторе кварц нетермостатирован и кварцевый резонатор не имеет ограничений по частоте. Может применяться и на частотах в сотни мегагерц, когда пластина кварца тонкая и наиболее чувствительна к температурным воздействиям при эксплуатации.

2. Опорные кварцевые автогенераторы. Нестабильность частоты  $q = 10^{-6} \dots 10^{-7}$ . Высокая стабильность опорных генераторов обеспечивается термостатированием кварца. В этом случае кварцевый резонатор или автогенератор в целом размещается в термостат. Термостат должен иметь высокую стабильность температуры, когда температура в нем изменяется не больше чем  $\pm 0,5$  °С при изменении температуры эксплуатации до 100 °С. Кроме того, эти автогенераторы ограничены по частоте не выше 5 МГц, когда толщина кварцевой пластины достаточно большая.

3. Эталонные кварцевые автогенераторы.  $q = 10^{-8} \dots 10^{-9}$ . Применяются для построения высокоточных эталонных измерительных приборов. В этих генераторах используют термостатирование кварца или генератора в целом и прецизионные кварцевые фильтры.

$$\text{Частота механических колебаний } f_{\text{мех}} = \frac{v_{\text{мех}}}{\lambda_{\text{мех}}},$$

где  $v_{\text{мех}}$  – скорость распространения механических колебаний в кварце.

Эта скорость различна в зависимости от направления среза пластинки. Если частота механических колебаний пластинки совпадает с вынужденной частотой  $f$  электрических колебаний, то будет резонанс.

В таком случае длина волны электрических колебаний

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{\lambda_{\text{мех}} \cdot C}{v_{\text{мех}}} = \frac{2a \cdot C}{v_{\text{мех}} \cdot n},$$

где  $C$  – скорость света.

Можно видеть, что чем больше толщина кварцевой пластинки, тем больше  $\lambda$ .

Следовательно, в кварцевых резонаторах на ВЧ пластинка должна быть тонкой. Учитывая, что пластинку кварца можно сделать толщиной не менее 100 мкм, резонансная частота кварца может быть до десятков мегагерц на основном тоне ( $n = 1$ ) или до сотен мегагерц на гармониках.

Поэтому, если частота передатчика должна быть выше указанных значений, то за автогенератором ставят умножители частоты.

### ***Принципы построения кварцевого автогенератора и характеристики его стабильности***

Кварцевая пластина с обкладками кварцедержателя в эквивалентной электрической схеме представляет собой сложный резонансный контур (рис. 11.9). На рисунке обозначено:

$L_K, C_K, R_K$  – эквивалентные параметры (индуктивность, емкость и сопротивление потерь соответственно) кварцевой пластины.

$C_0$  – ёмкость обкладок кварцедержателя.

Следовательно, имеем два резонансных контура, а значит, две резонансные частоты.

Левая ветвь контура имеет последовательный резонанс с частотой  $\omega_1$

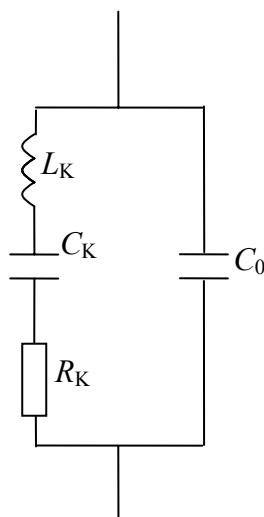


Рис. 11.9. Эквивалентная схема кварцевого резонатора

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_K C_K}}$$

С учетом емкости кварцедержателя имеем контур параллельного резонанса с частотой  $\omega_2$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_K C_3}} = \frac{1}{\sqrt{L_K \frac{C_K \cdot C_0}{C_K + C_0}}},$$

где  $C_3 = \frac{C_K \cdot C_0}{C_K + C_0}$ .

Посмотрим, как изменяется активное и реактивное сопротивление кварца в диапазо-

не частот и на каких частотах имеет место большая крутизна фазовой характеристики (рис. 11.10).

Построим фазовую характеристику кварцевого резонатора  $\varphi_{z\vartheta}(\omega)$ , где  $\text{tg}(\varphi_{z\vartheta}) = \frac{X_{\vartheta}}{R_{\vartheta}}$  (рис.11.11).

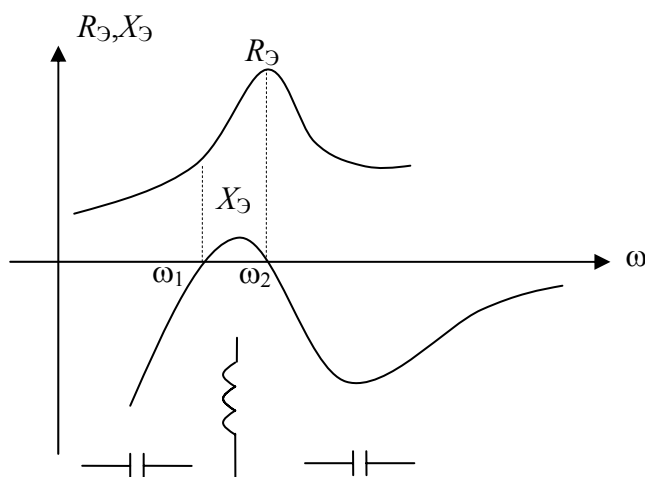


Рис. 11.10. Характеристики кварца в диапазоне частот

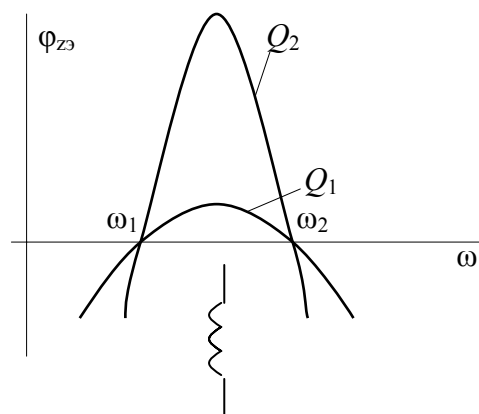


Рис. 11.11. Фазовая характеристика кварцевого резонатора

Можно видеть, что максимальная крутизна фазовой характеристики кварцевого резонатора находится около частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ .

В этом диапазоне частот  $\omega_1 - \omega_2$  кварц ведёт себя как индуктивное реактивное сопротивление, которое можно использовать как индуктивность для построения резонансной системы автогенератора. Высокая крутизна фазовой характеристики обусловлена высокой добротностью кварцевого резонатора, которая на 2...3 порядка выше, чем у LC-контура.

Чем выше добротность (случай  $Q_2$  на рис. 11.11), тем больше крутизна фазовой характеристики, тем больше может быть стабильность частоты предлагаемой схемы автогенератора. Кроме того, кварцевый резонатор имеет высокие эталонные свойства, низкий температурный коэффициент частоты, который имеет значение  $\alpha \leq 10^{-6}$ .

Следовательно, температурный коэффициент частоты на 2 порядка меньше температурного коэффициента LC-контура. На кварце-

вом резонаторе можно построить простейшие автогенераторы по схеме индуктивной или ёмкостной трёхточки (рис. 11.12 и 11.13).

В схеме, показанной на рис. 11.12 автогенерация выполняется на частоте из диапазона  $\omega_1 - \omega_2$ , когда кварцевые резонаторы используются как эквивалентные индуктивные сопротивления. В случае емкостной трёхточки (см. рис. 11.13) кварц используется на частоте автогенерации как индуктивное эквивалентное сопротивление и установлен в цепи база – коллектор транзистора, а значит, должен быть рассчитан на большее напряжение подключения в схеме.

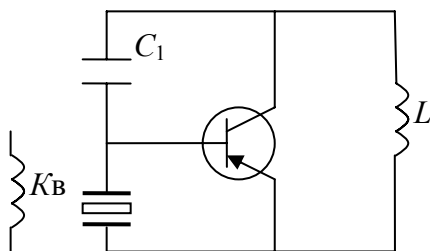


Рис. 11.12. Эквивалентная схема автогенератора индуктивной трёхточки

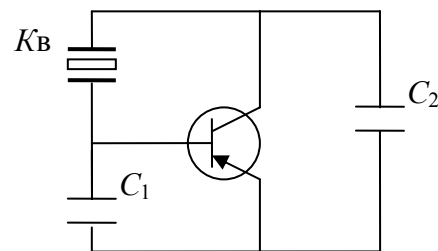


Рис. 11.13. Эквивалентная схема автогенератора ёмкостной трёхточки

В отмеченных схемах крупногабаритным является кварцевый резонатор.

Поэтому кварцевый автогенератор в микроэлектронном исполнении может быть в нескольких вариантах:

1. Кварцевый автогенератор выполняется в виде корпусированной микросхемы, в которой содержатся транзистор и ЭРЭ, определяющие режим работы, а вне корпуса микросхемы на печатной плате ЭС устанавливается навесной дискретный кварц и могут быть конденсаторы и индуктивность трёхточки. Указанные элементы трёхточки могут подбираться при регулировке и настройке ЭС для установки точного значения частоты автогенерации.

2. Автогенератор можно исполнить в виде микросборки на диэлектрическом основании по толстоплёночной или тонкоплёночной технологии и разместить кварцевую пластину в кварцедержателе без корпуса на этом же основании.

3. Микросборку автогенератора можно исполнить на самой кварцевой пластине – подложке микросборки. Чтобы прочие элементы ге-

нератора мало влияли на уменьшение амплитуды деформации пластины, их рекомендуется располагать ближе к узлам деформации кварцевой пластины, не занятых обкладками кварцедержателя.

### **Контрольные вопросы**

1. Самолетное ЭС как подсистема самолета. Обоснование исходных данных при проектировании самолетных электронных средств.
2. Особенности проектирования самолетных ЭС.
3. Использование виброизоляторов в самолетных ЭС.
4. Особенности компоновки самолетной аппаратуры.
5. Особенности проектирования корабельной аппаратуры.
6. Особенности проектирования автомобильных электронных средств.
7. Особенности проектирования носимых электронных средств.
8. Особенности проектирования автогенераторов.
9. Какими методами обеспечивают стабильность частоты автогенератора при наличии дестабилизирующих факторов?

## **12. ХУДОЖЕСТВЕННОЕ ОФОРМЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Техническая эстетика рассматривает основополагающие методы и принципы художественного конструирования, проблемы стиля и мастерства. Требования инженерной психологии и технической эстетики учитывались и при конструировании ЭС первых поколений. Особенностью конструирования современных ЭС является усиление этих требований ввиду широкого использования в конструкции ЭС пластмасс, дающих конструктору большую свободу выбора цвета и формы изделия; все большей зависимости внешнего вида и габаритов ЭС от элементов управления и индикации (ввиду уменьшения размеров панели управления); возрастания требований к внешнему виду; выпуска ЭС с учетом требований всех пользователей.

Алгоритм художественного конструирования электронных средств представлен на рис. 12.1. При разработке внешнего оформления конструкции ЭС наиболее важно учесть различные ограничения (социально-экономические, эргономические, конструктивные, технологические), а также факторы технической эстетики, влияющие на конструкцию через субъективные особенности художника-конструктора (знания в области технической эстетики, эргономики, конструирования электронной аппаратуры, технологических художественных возможностей производства, социальных проблем и т. д.).

Художник-конструктор, используя объективные факторы технической эстетики и учитывая различные ограничения, синтезирует художественное оформление конструкции. Оценивая результаты очередного шага конструирования, он может перейти к другому варианту или остановиться на последнем и выпустить конструкторскую документацию на художественное оформление. В ряде случаев художник-конструктор может влиять на изменение ограничений, например, настоять на изменении способов отделки, схемы компоновки конструкции.

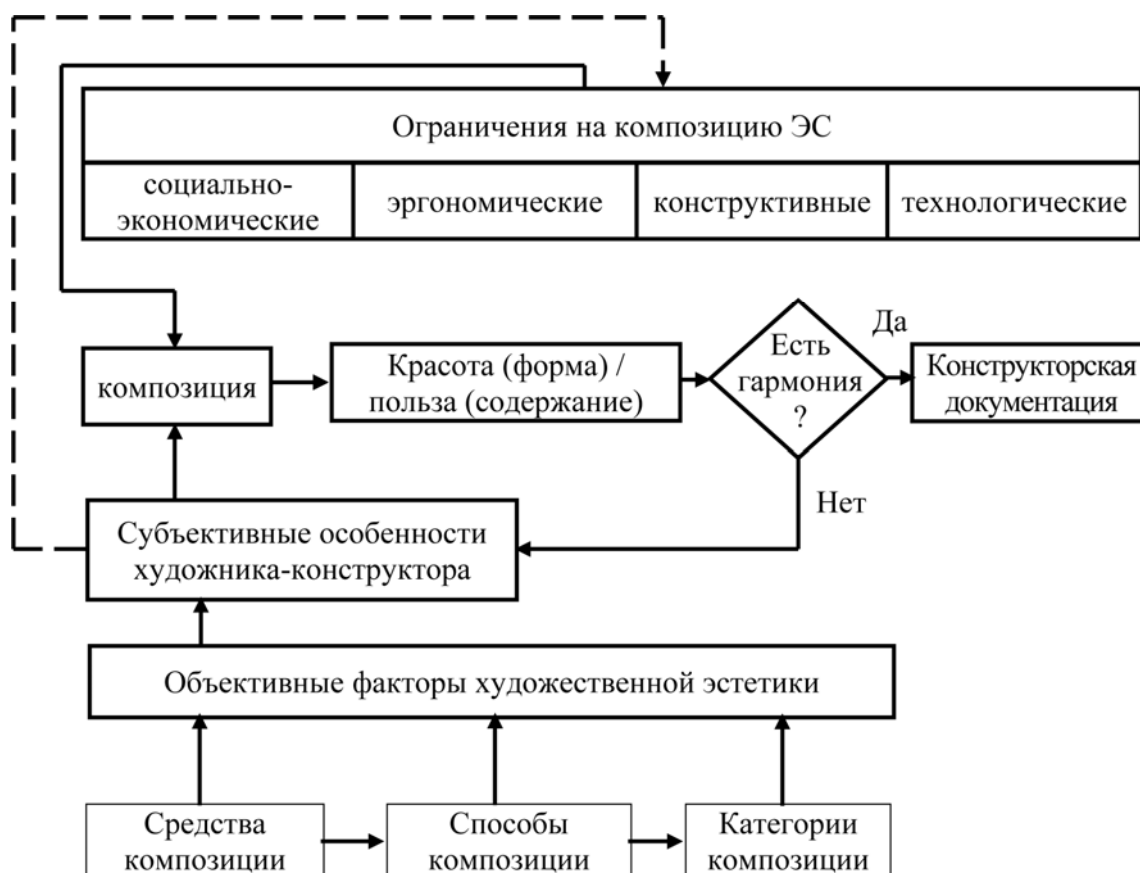


Рис. 12.1. Алгоритм художественного конструирования



К **социально-экономическим факторам** относятся: обеспечение общественно-необходимых потребностей, ориентация на конкретную группу потребителей, устранение дублирования функций в различных устройствах (радиоприемник, магнитола), унификация, экономия материальных и трудовых ресурсов, конкурентоспособность, обеспечение сбыта, патентоспособность. Художественное оформление, например, радиоприемника, зависит от его назначения – связная аппаратура, бытовая аппаратура индивидуального или коллективного пользования. При художественном конструировании обязательно должна учитываться социальная группа потребителей: женщины, космонавты, военнослужащие, врачи, дети и т. д.

Патентованию подлежит **промышленный образец**, который признается новым художественно-конструкторским решением изделия, определяющим его внешний вид, соответствующим требованиям технической эстетики, пригодным к изготовлению промышленным способом и дающим положительный эффект.

Художественно-конструкторское **решение признается новым**, если по совокупности своих существенных признаков оно отличается от аналогичных решений, известных в России или за рубежом, и не раскрыто на дату приоритета заявки для неопределенного круга лиц настолько, что стало возможным его осуществление. Художественно-конструкторское **решение признается соответствующим требованиям технической эстетики**, если оно обладает художественной и информационной выразительностью, целостностью композиции, рациональностью формы (удовлетворяет эксплуатационным, конструктивным и технологическим требованиям, соответствует требованиям эргономики).

Положительный эффект может быть экономическим (экономия материала и др.), техническим (упрощение конструкции или технологии и т. д.) либо каким-то иным (повышение комфортности, улучшение техники безопасности и т. д.). Качество художественного оформления ЭС (его композиции) характеризуется соотношением красоты и пользы (формы и содержания), т. е. гармоничностью (от греч. *harmonia* – связь); это стройность, соразмерность частей; слияние различных компонентов объекта в гармоничное целое (изделие).

## 12.1. Основы композиции

**Композиция** (от лат. *compositia* – составление, расположение, сочинение) определяет взаимосвязь важнейших элементов конструкции художественного произведения и выражает замысел автора. Итальянский мыслитель эпохи Раннего Возрождения Леон Баттиста Альберти писал: *"Красота (синоним прекрасного) есть строгая соразмерная гармония всех частей, объединенных тем, чему они принадлежат, – такая, что ни прибавить, ни убавить, ни изменить ничего нельзя, не сделав хуже..."*. Красота характеризуется рядом частных показателей, к которым относятся гармоничность, выразительность, оригинальность, стилевое единство, современность стиля. Все эти критерии взаимосвязаны и носят качественный характер, что затрудняет объективность оценки.

**Гармоничность** – свойство формы конструкции быть органично согласованной с элементами формы, что достигается определенным соотношением размеров, форм, яркости, цвета, расположения отдельных элементов. Требование гармоничности включает требование согласованности с помещением, где располагается конструкция.

**Выразительность** – способность конструкции своим внешним видом наглядно отображать качество, обеспечивая соответствующее эстетическое восприятие. Выразительности добиваются с помощью таких способов и средств композиции, как целостность формы, композиционное равновесие, взаимодействие конструкции и пространства.

**Оригинальность** – совокупность своеобразных элементов формы и их отношений, позволяющая отличить данную конструкцию от однотипных. Это понятие предполагает наличие национальных, отраслевых, фирменных признаков.

**Стиль** – это устойчивая общность формально-художественных средств, отражающая исторически сложившиеся социально-экономические и идейно-эстетические принципы и художественно-конструкторские методы и средства их воплощения. Известно много стилей: античный (классический), готический, возрождения, рококо, барокко, русский классический и т. д. Ведущими принципами современного стиля являются предельная общественная целесообразность,

гуманность (всё для человека!), демократизм (всё для народа!), общий мажорный тон, чистота, ясность, изящество.

**Современность стиля** означает согласованность между общим стилем конструкции и лучшими образцами мировой культуры.

**Мода** (в отличие от стиля) представляет собой менее устойчивую общность названных методов и средств.

**Полезность изделия** заключается в удовлетворении социально-экономических потребностей определенной группы пользователей, а также в удобстве пользования изделием (утилитарности).

**Форма в художественном конструировании** рассматривается как сложное комплексное явление. Это система материальной организации предметов (объемно-пространственной, фактурно-цветовой, конструктивно-технологической и т. д.). Форма отражает все качества конструкции: технологичность, рациональность компоновки, удобство эксплуатации и обслуживания, эстетическую выразительность и т. д. Она обладает рядом свойств: объемно-пространственной структурой, геометричностью строения (поверхности, грани, ребра, точки), весомостью, прочностью, массивностью, плотностью, динамичностью, цветовым и световым колоритом. Зная эти свойства, можно с помощью контраста создать максимально выразительное изделие. Одной из важнейших характеристик формы является ее целостность, определяющая возможность мгновенной оценки структуры и качества изделия. Из потока неупорядоченной информации человек может воспринять за секунду не более 3...5 бит. Это значит, что число членений формы должно быть не более 8...32 (рекомендуется не более 23...25). При приеме организованной (осмысленной) информации человек может воспринять за секунду 15...20 (до 50) бит. Важнейшей характеристикой формы является ее утилитарность.

## 12.2. Категории композиции

Категории композиции являются (см. таблицу) наиболее общими факторами технической эстетики. Подобно любой научной дисциплине, теория композиции базируется на категориях (тектоника, объемно-пространственная структура, цветовая гармония), отражающих

наиболее существенные связи и отношения формы. Эти категории образуются с помощью способов и средств композиции.

**Взаимосвязь средств, способов, категорий  
и критериев композиции**

| <b>Средство</b>  | <b>Способ</b>   | <b>Категория</b>   | <b>Критерий</b>  |
|--|---|--|--|
| Форма частей и целого<br>Цвет<br>Взаимное расположение<br>Масштаб<br>Пропорции<br>Ритм<br>Симметрия / асимметрия         | Выделение ведущего признака (повторение большого в малом, выделение композиционного центра, соподчиненность, соразмерность, расчлененность) | Тектоника.<br>Объемно-пространственная структура.<br>Цветовая гармония | Красота / польза (форма / содержание).<br>Гармоничность. Выразительность (целостность формы) Оригинальность Стилевое единство. Современность стиля. Утилитарность. |
| Взаимодействие объёма и пространства<br>Распределение масс частей относительно центра композиции<br>Пропорции<br>Масштаб | Зрительное композиционное равновесие  |  |  |
| Форма<br>Цвет<br>Взаимное расположение<br>Пропорции<br>Масштаб   | Контраст  |  |  |
| Тон  | Нюанс   |  |  |

|  |                       |  |  |
|--|-----------------------|--|--|
| Фактура<br>Пластика<br>Светотень                                       |                       |  |  |
| Ритм<br>Симметрия / асимметрия<br>Взаимодействие объёма и пространства | Статистика / динамика |  |  |

**Тектоника** есть зримое отображение работы конструкции и материала в форме, т. е. связь формы и содержания. Например, говорят о тектонике штампованной, прессованной, литой, деревянной конструкции.

**Объемно-пространственная структура** характеризует взаимодействие формы и ее элементов между собой и с окружающим пространством. Инженер часто просто не учитывает взаимодействие изделия и пространства.

Различают следующие структуры конструкции:

- плоскую (фронтальную),
- объемную,
- глубинно-пространственную.

Типичный пример плоской конструкции – лицевые панели, характерным признаком которых является взаимное расположение элементов плоской и пространственной формы по двум координатам. Объемную конструкцию представляет форма изделия в целом, которая характеризуется распределением объемов и масс по трем координатам. Все три измерения в композиционном отношении одинаково важны. Глубинно-пространственная структура учитывает размещение одних объектов среди других объектов комплекса и образуется с помощью выбора пропорций и масштаба.

Важная категория композиции – **цветовая гармония**; она реализуется с учетом требований эргономических характеристик зрения. Умело сочетая те или иные цвета, можно создать впечатление легкости и тяжести, холода и тепла, простора и тесноты, выступления и отступления элементов и узлов изделия. Цвет необходим для выделения

нужных деталей (наиболее важных клавиш, элементов, находящихся под высоким напряжением и т.д.).

Цвет является средством эстетического воздействия, влияет на настроение, поднимая и понижая эмоциональный тонус, вызывая творческий подъем. С помощью цвета можно акцентировать нужные элементы формы или композиционно ослабить их, соподчинить и в известной мере объединить, когда необходимо "собрать" элементы структуры, которые не поддаются иным приемам соподчинения. Правильное применение цвета повышает конкурентоспособность изделия. Хотя существуют объективные закономерности композиции, но цвет – одно из самых субъективных средств композиции.

Особенно тщательно должны быть продуманы цветовые контрасты, ибо излишний контраст может нарушить целостность формы. Для ЭС наиболее целесообразно применять гармонирующие оттенки одного и того же цвета (например, черный, темно-серый, светло-серый или песочный, бежевый, оливковый и т. д.). Это не исключает применения при необходимости контрастирующих цветов: красного – для сигнализации об аварийном режиме, зеленого – для маломощных элементов индикации, обозначения трубопроводов с водой и т. д.

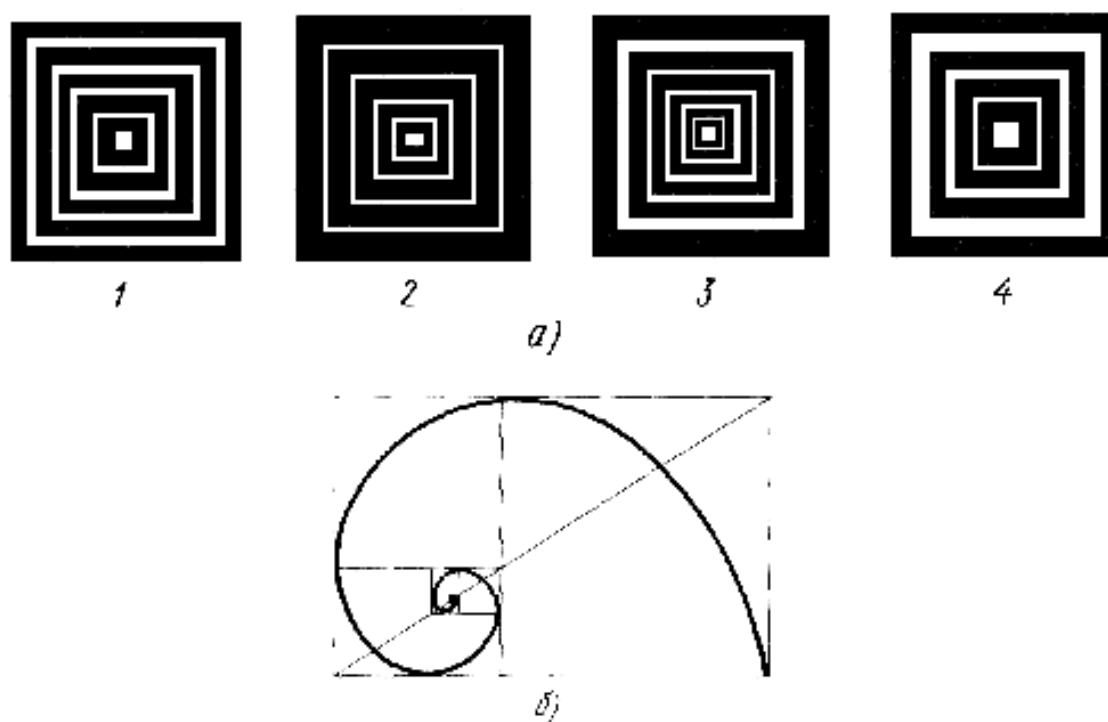
### 12.3. Средства композиции

К **средствам композиции** относят форму частей и целого, их цвет, тон, взаимное расположение частей, ритм чередования, симметрию/асимметрию, пропорциональность, масштабность, фактуру, пластику, светотень, взаимодействие объема и пространства и т. д. Различные **способы композиции** получают, комбинируя различные средства композиции. К способам композиции можно отнести выделение ведущего признака, композиционное равновесие, контраст, нюанс, статику/динамику.

Рассмотрим средства композиции.

**Ритм** – средство, обеспечивающее выделение и связь элементов формы путем их повторения, чередования, нарастания, убывания. Сущность всякого ритма заключается в ассоциации с движением (равномерным или ускоренным). Ритм простейшего вида называется

метром и достигается равномерным размещением элементов (линий, клавиш, знаков и т. д.). Ритм сообщает конструкции статическое или динамическое выражение, он способствует ее более четкому зрительному восприятию. Метр ассоциируется с равномерным движением. Динамичности достигают, например, изменяя шаг, толщину или одновременно шаг и толщину линий (рис. 12.2, а), а также вводя кривые линии с изменяющейся кривизной (рис. 12.2, б). Линии, имеющие меньший радиус кривизны, отражают более напряженный (динамичный) ритм.



*Рис. 12.2. Организация ритма вариацией шага и толщины линий (а), изменением крутизны кривой (б): 1 – ритм проявляется только в закономерном сокращении стороны квадратов; 2 – активность ритма возрастает с убыванием толщины решетки к центру; 3 – предельно активен ритм при одновременном изменении промежутков и толщины; 4 – ритм нарушен вследствие изменения интервала при неизменной толщине решетки*

**Симметрия** – организация элементов конструкции, основанная на правильном их размещении относительно центра или оси. Конструкции, не обладающие симметрией, называются асимметричными. В сознании человека симметрия ассоциируется со статичностью (равно-

весеи), что способствует уменьшению утомляемости. Различают относительную симметрию (рис. 12.3, а), когда относительно оси или плоскости уравниваются элементы примерно одинакового качества (по форме, размеру, цвету), и контрастную симметрию (рис. 12.3, б), когда уравнивание выполняется установлением соотношения величины и взаимного положения различных форм: осевую (ромашка), винтовую (улитка); орнаментальную и т. д. Симметрия способствует выявлению главного в композиции, предопределяя его направленность к центру, оси симметрии, плоскости симметрии.

Среди классических средств композиции на первое место можно поставить пропорции как по степени важности того качества, которое достигается с их помощью (пропорциональность), так и с точки зрения их возможностей при организации формы.

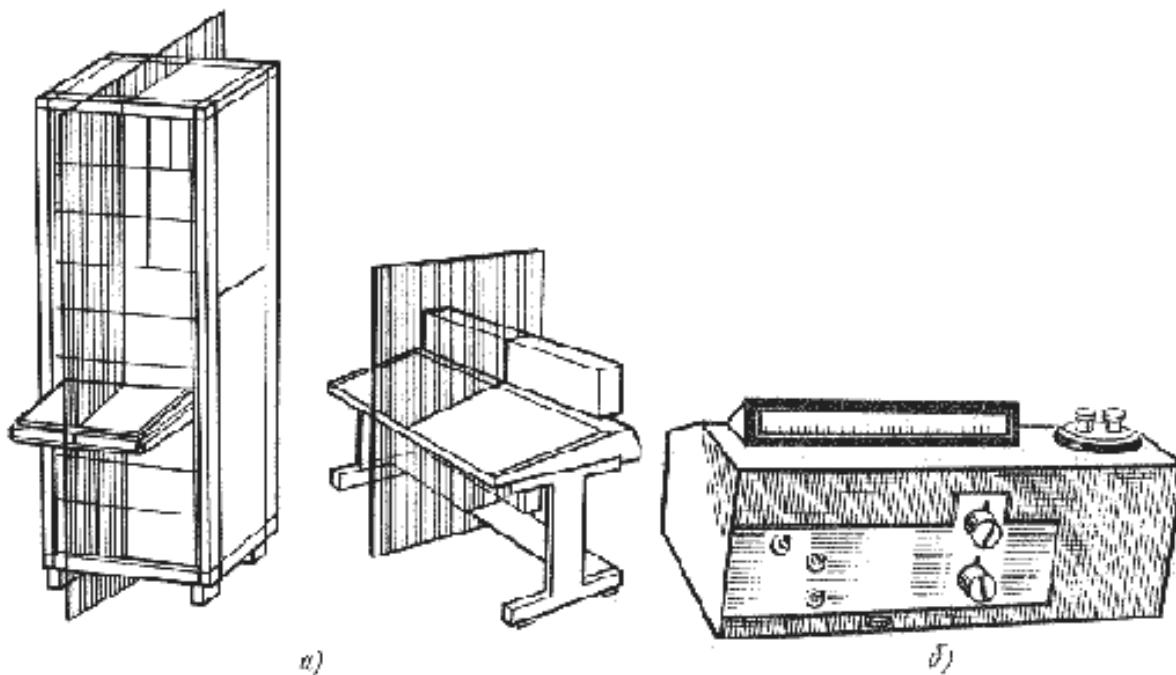


Рис. 12.3. Виды симметрии: а – относительная (зеркальная); б – контрастная

**Пропорциональность** – соразмерность частей и форм между собой, а также между собой и целым. От удачно найденного соотношения частей изделия в значительной степени зависят композиционная целостность и гармоничность всего изделия. В основе пропорциональности лежат закономерности роста: органического (растения, жи-



вотные) и неорганического (кристаллы). Так, закономерность органического роста находит отражение в динамике так называемого "золотого" сечения (рис. 12.4). С использованием этого соотношения были созданы многие замечательные памятники культуры. Размеры гармонично развитого человека отвечают соотношению "золотого" сечения (рис. 12.4, а). Законы неорганического роста выражают покой.

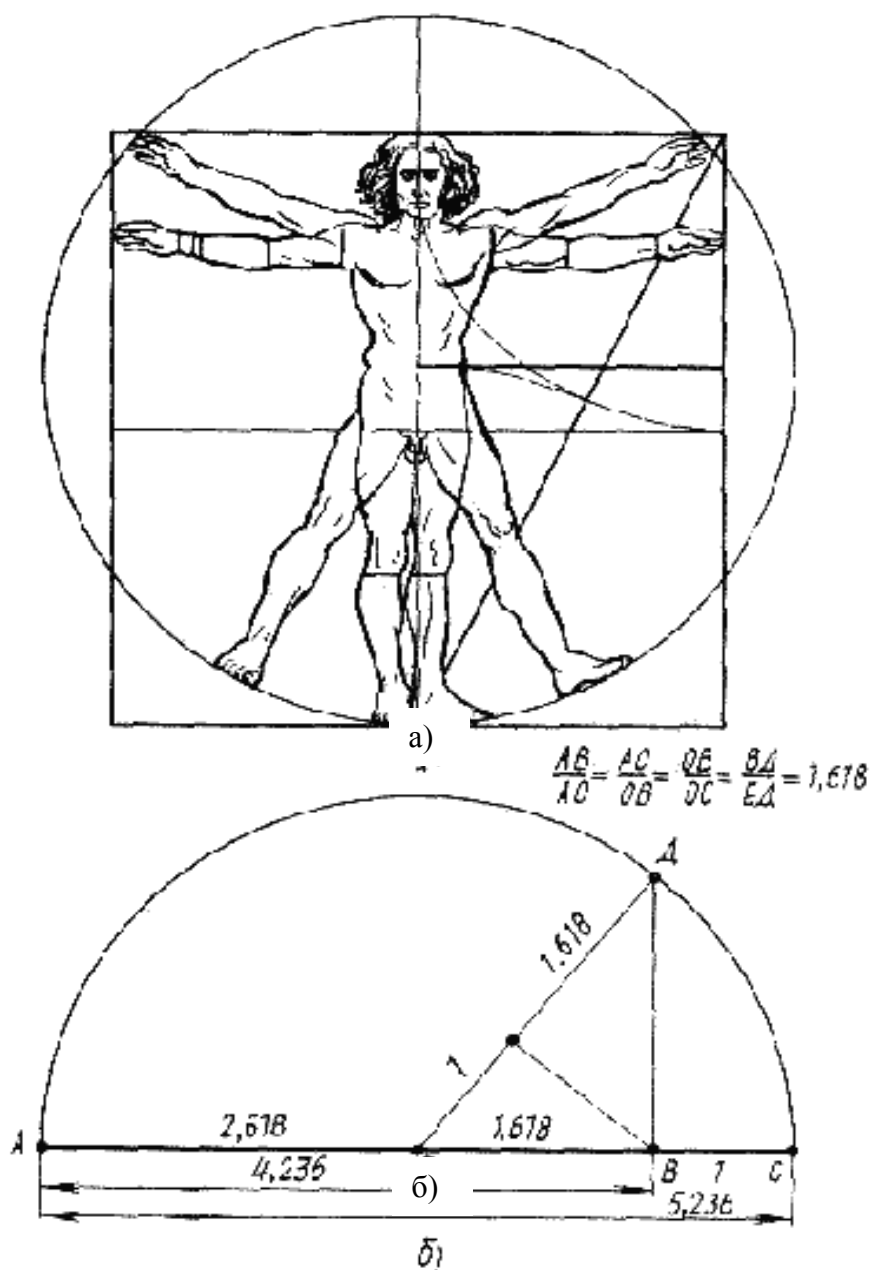


Рис. 12.4. "Золотое" сечение: а – в соответствии с размерами человеческого тела; б – геометрическое соотношение

Исследователи объясняют сущность пропорций исходя из законов механики, рационального строения и зрительного восприятия форм природы и человеческого тела, равно как и других особенностей и условий формообразования. При определении пропорциональных соотношений в промышленности находят широкое применение ряды предпочтительных чисел ( $R5, R10, R20, R40$ ) и ряды нормальных размеров ( $Ra5, Ra10, Ra20, Ra40$ ), построенные на основе геометрической прогрессии. Большое распространение в технике получили пропорции, связанные с соотношением сторон или площадей 1:2; 2:3 и т. д. С помощью пропорций реализуется такой важный способ композиции, как соподчиненность форм. Пропорции тесно связаны с другими средствами – контрастом, нюансом, масштабом и т. д. "Человек есть мера всех вещей" – эти слова, высеченные на мраморе одного из дельфийских храмов, афористически точно выражают сущность масштабности предметного мира – всего, что человек создает для себя.

**Масштабность** – зрительно-пространственная характеристика размеров конструкции изделия. Истоки масштабности в закономерном строении форм природы, где всякому изменению количественных признаков организмов соответствуют изменения качественных особенностей формы. В основе масштабности лежит отношение части к целому, изделия в целом и его частей – к окружающим предметам, к размерам человека.

Масштабность – относительная характеристика. Характер масштабности обусловлен степенью расчлененности, детализировкой формы. Части человеческого тела ранее являлись основой всех измерений (фут, дюйм, пядь, ладонь, аршин, сажень, локоть и т. д.). Метрическая система не связана с размерами человеческого тела. Поэтому для получения гармоничного изделия необходимо использовать масштаб, позволяющий сопоставить размеры изделий с размерами человеческого тела. В электронных средствах масштабные характеристики связаны с деталями, размеры которых обусловлены техническими и эргономическими требованиями. Например, клавиши, кнопки имеют относительно постоянные размеры независимо от размеров изделия. Такие элементы носят название указателей масштаба. На масштабное восприятие формы изделия оказывают влияние зрительные иллюзии. Так, вертикальные формы кажутся больше равных им горизонталь-

226

ных форм (рис. 12.5, а), кажущаяся разница может достигать 35 %. Светлые предметы кажутся крупнее темных (рис. 12.5, б). Большую роль единство масштаба играет в условиях, когда от человека зависит надежность всей системы, например при управлении полетом самолета. В этом случае использование индикаторов со шкалами разного размера абсолютно недопустимо. То же относится и к оформлению пульта управления электронными средствами.

**Фактура и пластика** служат для создания нюансных способов отделки, фактура – для создания тонких контрастов, например противопоставление матовой и полированной поверхности одного и того же материала.

**Соотношение (взаимодействие) объема и пространства** часто позволяет выделить наиболее важные в композиционном отношении части. При необходимости сосредоточить на чем-либо внимание взаимодействие объема и пространства в этом месте следует сделать более напряженным. Однако чрезмерное увеличение проникновения пространства в объем может свести на нет роль формы, а чрезмерное проникновение объема в пространство может создать впечатление незавершенности (рис. 12.6, а, з, д, е), которое отсутствует при ограничении пространства (рис. 12.6, б, в).

Специфику таких средств, как форма частей и целого, их взаимное расположение целесообразно рассмотреть применительно к **способам композиции**, которые занимают промежуточное место между средствами композиции и ее категориями. Одной из важнейших составляющих красоты является **выразительность композиции**, которая, в частности, достигается путем обеспечения единства композиции (целостности формы). Единство композиции считается важней-

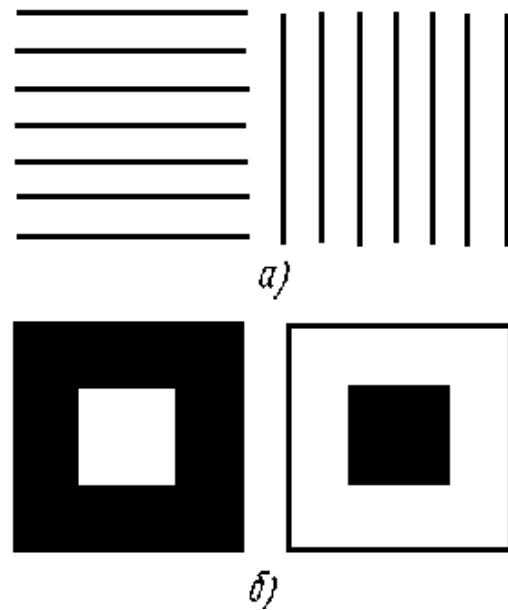


Рис. 12.5. Кажущаяся длина вертикальных и горизонтальных линий (а) и кажущаяся площадь темного квадрата на светлом фоне и светлого квадрата на темном (б)

шим принципом художественного конструирования, при помощи которого достигается гармония. При этом важным способом является выделение главного, ведущего признака, например конфигурации, геометрических размеров (повторение большого в малом), соподчиненности, композиционного равновесия, соразмерности, расчлененности. Таким образом согласно этому принципу ведущий признак – признак целого – должен быть присущ в той или иной мере всем элементам композиции. Так, принцип "большое в малом" заключается в близости элементов композиции по ведущему признаку целого.

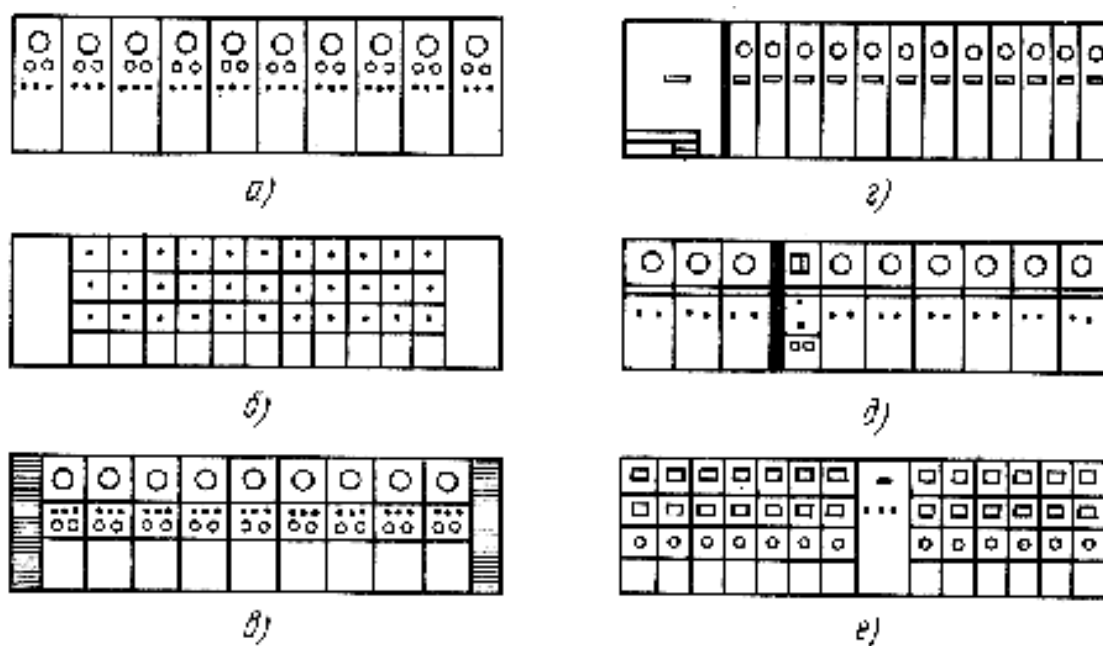


Рис. 12.6. Взаимосвязь объема и пространства при организации системы из ряда стоек

**Соподчиненность** играет большую роль при обеспечении выразительности композиции и целостности формы. Быстрота восприятия композиции во многом зависит от логичности и ясности связей пространственных элементов системы.

**Зрительное равновесие композиции** – это зрительная уравновешенность частей и целого относительно пространственных осей. Рассмотрим несколько вариантов объемного решения пульта управления (рис. 12.7).

Показателем зрительной устойчивости модели является отношение площади основания к консольной части (рис. 12.7, а). Незначи-

тельное увеличение консоли (рис. 12.7, б) не вызывает ее неустойчивости. На рис. 12.7, в зрительно равновесие пульта находится на пределе. На рис. 12.7, г предел равновесия уже нарушен, а на рис. 12.7, д только опоры препятствуют опрокидыванию. Вариант на рис. 12.7, е более устойчив, так как задняя стенка имеет обратный наклон. Однако дальнейшее увеличение этого наклона (рис. 12.7, ж) может привести к зрительному эффекту обратного опрокидывания. Увеличение отрицательного наклона передней стенки также приводит к зрительному эффекту обратного опрокидывания (рис. 12.7, з). Модели рис. 12.7, и, к являются зрительно устойчивыми, в модели рис. 12.7, к устойчивость достигнута благодаря вынесению части консоли назад, а в модели (рис. 12.7, и) – благодаря небольшому отрицательному наклону задней стенки.

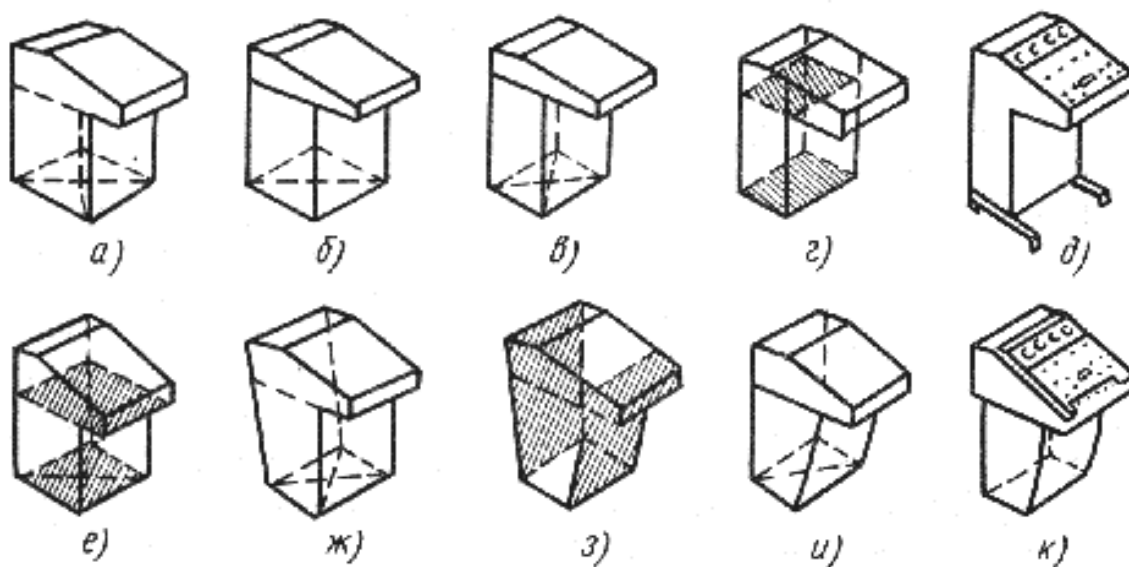


Рис. 12.7. Варианты построения зрительно устойчивого пульта управления

Использование соподчинения и композиционной уравновешенности тесно связано с использованием пропорций, ритма, масштаба, симметрии, цветового колорита, контраста, нюанса.

**Контраст** – резко выраженное противопоставление друг другу однородных элементов целого (по форме, объему, цвету, размерам, конфигурации и т. д.), которое подчеркивает гармоничность восприятия целого. Те элементы, которые необходимо выделить из общей совокупности, обычно имеют неповторяющуюся форму и окрашива-

ются в контрастирующие цвета. Сила и слабость контраста в его выразительности. При чрезмерном контрасте может нарушиться целостность формы и усиливается утомляемость оператора.

**Нюанс** – незначительное различие между однородными противопоставляемыми элементами целого, позволяющее смягчить контраст. Нюанс может проявляться в пропорциях, ритме (чередовании черных и белых полос), цветовых и тональных отношениях, пластике, построении поверхностей со сложными локальными образующими. Использование нюанса – это основное, что делает изделие элегантным.

Любая форма так или иначе взаимодействует с пространством. Упорядоченность взаимодействия объема и пространства создает композиционную целостность формы. Чем глубже пространство проникает в объем, тем активнее роль пространства в композиции.

**Статичность или динамичность композиции** достигается благодаря использованию ритма, симметрии/асимметрии, взаимодействия объема и пространства. Таким образом, в распоряжении художника-конструктора имеется обширный набор средств и способов технической эстетики, с помощью которых можно обеспечить эргономичность конструкции ЭС и ее художественные качества. При обработке композиции используются государственные и отраслевые стандарты, а также рекомендации *ISO* (<http://www.iso.org>).

#### **12.4. Особенности внешнего оформления профессиональных и бытовых электронных средств**

С точки зрения специфики внешнего оформления все ЭС удобно разделить на **профессиональные** и **бытовые**. При конструировании профессиональных ЭС в большей степени учитываются эргономические параметры, а при конструировании бытовых ЭС – эстетические качества.

##### ***Конструирование профессиональных ЭС***

Человек-оператор при работе на профессиональных ЭС выполняет свои функции на рабочем месте, под которым понимается зона, оснащенная необходимыми техническими средствами. При эргономическом конструировании рабочего места необходимо учитывать рабочую позу человека-оператора (сидя, стоя, стоя/сидя); потребность

оператора в обзоре рабочего места, а также соседних рабочих мест; наличие рабочей поверхности для письма, установки телефонных аппаратов, хранения документов, наличие пространства для ног при работе сидя; конфигурацию и размеры индикаторов и органов управления; приоритет, последовательность и темп поступающей информации; частоту использования органов управления, их связь с элементами индикации.

Размеры рабочего места, его организация и утомляемость оператора зависят от позы. Если затраты энергии при работе сидя в прямой позе принять равными единице, то выполнение той же работы стоя требует затрат энергии в 1,6 раза больше, сидя в наклонной позе – в 4 раза, стоя в наклонной позе – в 10 раз больше. На рис. 12.8, а показано положение человека относительно пульта в сидячем положении, на рис. 12.8, б – в положении сидя/стоя, на рис. 12.8, в – в положении стоя.

Пространство для размещения бумаги и пишущих принадлежностей должно быть от 100 до 200 мм в глубину, если предполагается, что оператор будет делать заметки. Для выполнения записей и установки телефона и документов этот размер следует увеличить до 400 мм. Основным требованием является размещение элементов индикации на линии, проходящей через ось глаз в соответствии с наклоном головы оператора (рис. 12.9).

**Элементы индикации и управления** следует размещать в соответствии с ГОСТ 23000-78 "Пульты управления. Общие эргономические требования". При расположении индикаторов следует учитывать их приоритет (роль при достижении цели; цена ошибки оператора; частота использования; сроч-

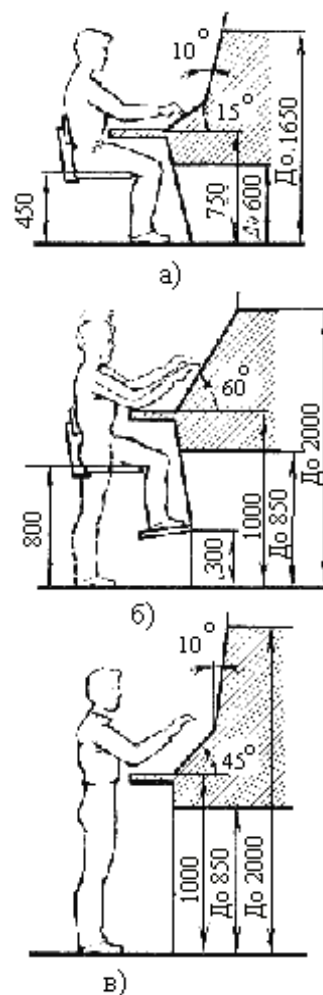


Рис. 12.8. Основные размеры пульта для рабочих поз человека оператора: сидя (а), стоя и сидя (б), стоя (в). Заштрихована зона размещения органов управления и устройств индикации

ность использования информации; надежность работы индикаторов). Наиболее приоритетные индикаторы располагают прямо перед оператором, менее важные – сбоку слева, еще менее важные – сбоку справа. Следует также учитывать идентичность информации; логическую связь между сообщениями; совместное использование индикаторов; соответствие размещения индикаторов и технических устройств, работа которых отображается; соответствие навыкам оператора.

Чтобы облегчить обнаружение отклонения одного из параметров группы индикаторов, их указатели в нормальном режиме следует устанавливать в одинаковом положении (рис. 12.10).

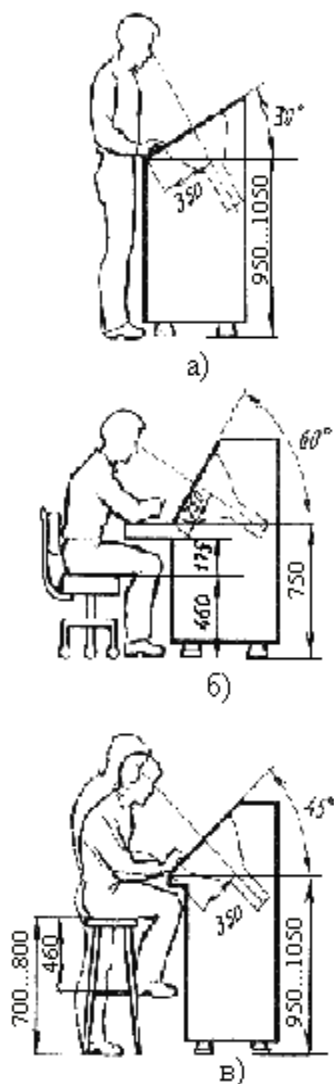


Рис. 12.9. Положения оператора за выносным индикаторным пультом радиолокационной станции: а – стоя; б – сидя; в – стоя и сидя

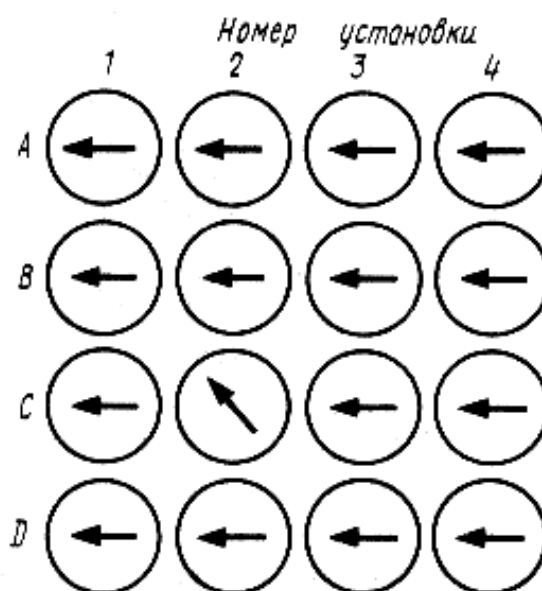


Рис. 12.10. Расположение указателей индикаторов для фиксации отклонения режима от нормального (A, B, C, D – измеряемые параметры)

Для концентрации внимания операторов элементы индикации могут быть объединены в логические блоки рамкой или их расположению может придаваться динамический характер, например путем сужения поля в месте максимальной информативности (внизу



экрана). Уменьшить габаритные размеры панелей индикации можно, используя комбинированные (интегральные) индикаторы, совмещенные с органами управления (светящаяся кнопка).

Эффективность выполнения операций управления в значительной степени зависит от конструкции органов управления и характера их размещения друг относительно друга и относительно органов индикации. Панель органов управления имеет наклон к горизонтальной плоскости от  $15^\circ$  до  $30^\circ$ . Органы управления должны находиться в пределах досягаемости рук человека. На рис. 12.11 в горизонтальной плоскости имеются зоны:  $A_1$  – легкой доступности, обзор без поворота головы;  $A_2$  – максимальной досягаемости; Б – сравнительно легкой доступности, обзор с поворотом головы; В, Г – вспомогательных движений, в зоне В обзор возможен при повороте головы, в зоне Г – при повороте туловища. Ломаная линия – возможное положение в плане трех вертикальных панелей одного щита или пульта. При большем числе вертикальных панелей взаимное расположение их (в плане) может соответствовать ломаной линии, ограничивающей с внешней стороны зоны А – Г.

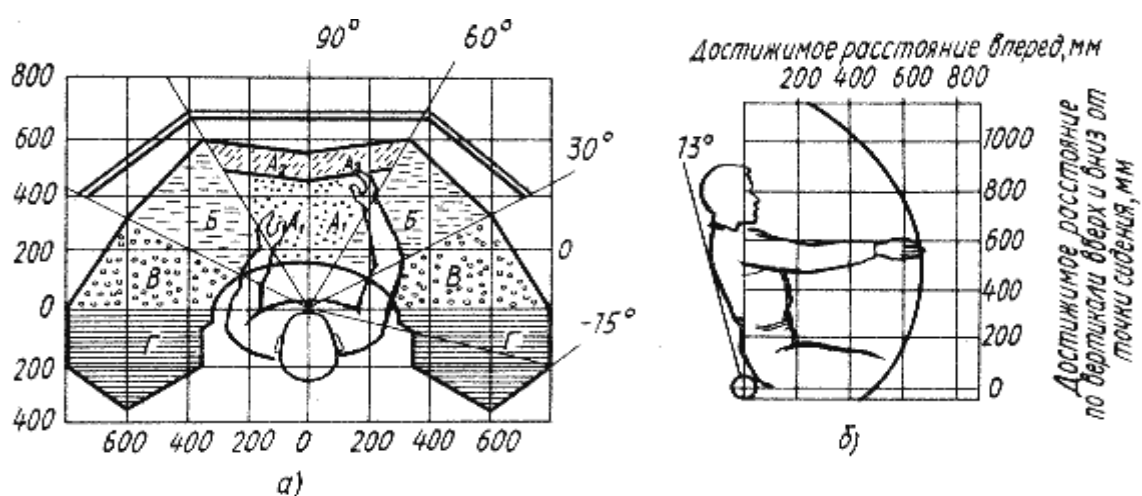


Рис. 12.11. Зоны досягаемости панели управления в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

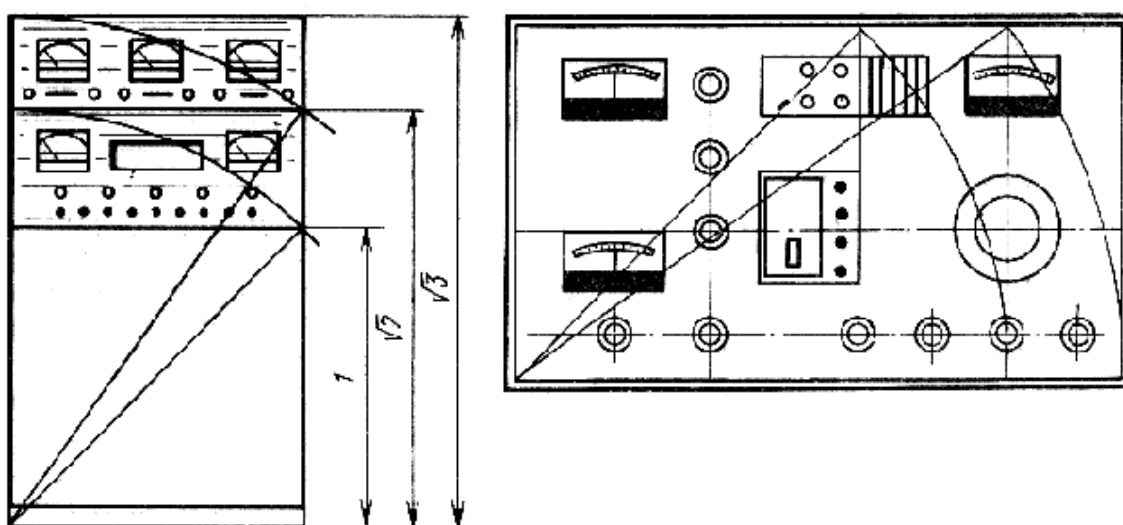
### **Целостность панели управления ЭС**

Целостность панели управления ЭС достигается благодаря умелому использованию соподчиненности второстепенных элементов главным, пропорциональности и масштабности. Для лицевой панели ЭС ведущим является ее фон, ведомыми – шкалы, индикаторы, кнопки

ки, тумблеры, переключатели, ручки и т. д. Среди ведомых можно выделить наиболее значимые элементы. Пропорции в вертикальном направлении являются более значимыми, чем в горизонтальном. Основным средством достижения пропорциональности является геометрическое подобие на основе использования рядов: арифметических ( $H1 - H2 = H2 - H3$ ), геометрических ( $H1:H2 = H2:H3$ ), гармонических ( $H1:H3 = (H1 - H2)/(H2 - H3)$ ) и др. Пропорции, основанные на определенных отношениях, воздействуют весьма активно как зримо воспринимаемая закономерность, нарушение которой сводит на нет целостность формы. Стойка ЭС, построенная с использованием иррациональных соотношений, представлена на рис. 12.12.

В обоих случаях пропорционирование заключается в увеличении размера прибора в соответствии с иррациональными соотношениями ( $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ;  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ), образуемыми сторонами квадратов и их диагоналями.

Одним из методов пропорционирования является использование соразмерности всего устройства и его частей, называемых модулями  $m$ .



*Рис. 12.12. Стойка, высота частей которой получена с использованием иррациональных соотношений; передняя панель, ширина которой выбрана с использованием иррациональных соотношений*

Пропорциональные закономерности могут быть усилены масштабированием, ритмичностью, контрастом и нюансом. Статичности при конструировании панели ЭС достигают путем симметричного расположения рядов клавиш и элементов индикации относительно

оси (плоскости) симметрии или контрастного симметричного расположения разногабаритных и разнотоновых элементов (рис. 12.13).

При компоновке панели управления в целом необходимо принимать во внимание взаимное расположение органов индикации и управления с учетом последовательности работы с ними, с тем чтобы органы зрения и управления человека двигались в одном направлении без резких скачков и зигзагов; при работе с двумя и более ручками регулировки руки оператора не должны перекрещиваться; при работе двумя руками следует стремиться к тому, чтобы движения оператора были симметричны и синхронны; при наличии нескольких разнесенных пультов их состав и расположение должны быть хорошо продуманы.

При разработке конструкции для улучшения внешнего вида электронных средств широко используют оптические иллюзии. Например, белые фигуры на черном фоне кажутся больше черных фигур на белом фоне, вертикальные линии кажутся длиннее горизонтальных, так как глаз точнее оценивает размеры по ширине, чем по высоте и глубине.

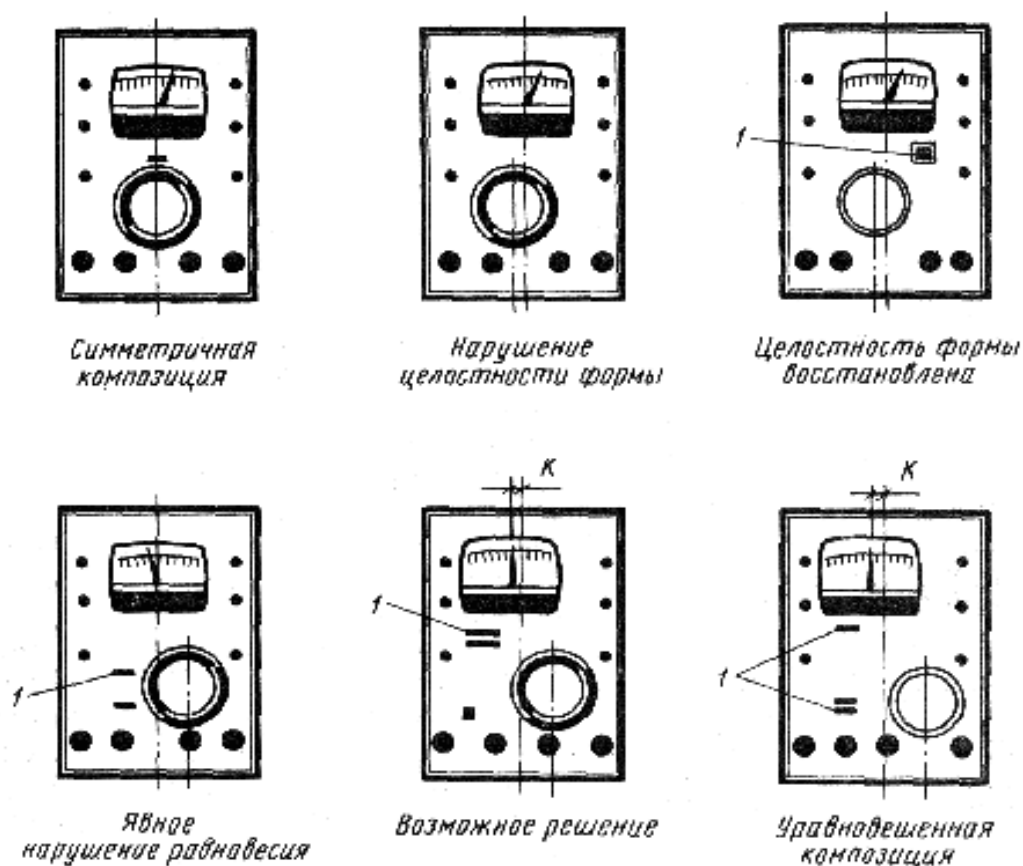


Рис. 12.13. Зрительное уравновешивание конструкции передней панели прибора: 1 – разнотонные элементы (фирменные знаки, надписи)

Поэтому для создания иллюзии ширины следует наносить горизонтальные линии; сходящиеся к центру симметрии линии увеличивают горизонтальный размер, а расходящиеся – уменьшают его (рис. 12.14); изменение шага чередования линий или их толщины создает впечатление динамичности.

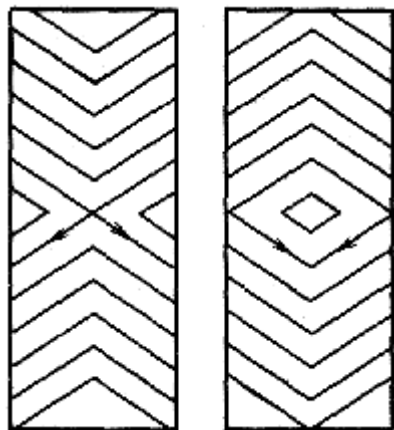


Рис. 12.14. Иллюзия изменения поперечного размера при сходящихся и расходящихся из центра наклонных линиях

дает впечатление динамичности.

При внешнем оформлении профессионального ЭС необходимо обращать внимание на эргономичность и эстетичность вспомогательных элементов – соединителей, ручек для переноски, элементов крепления, опорных ножек, направляющих и т. д.

### ***Внешнее оформление бытовых ЭС***

Первые радиоприемники были оформлены без привлечения дизайнеров. Органы управления и переключения были такими же, как и на профессиональной технической аппаратуре. Успехи в миниатюризации электронных ламп, появление электронолучевых трубок и усложнение шкал привели к внедрению "мебельного" стиля. Футляры приемников и телевизоров 50-х годов имели внушительные размеры. Шкала приемника и экран телевизора занимали сравнительно небольшое поле на передней панели. Уменьшение размеров деталей и узлов позволило в 60-х годах уменьшить габаритные размеры аппаратуры и конструировать телевизоры и приемники с учетом размера экрана телевизора или шкалы приемника, которые в основном определяли их габаритные размеры. Стремление уменьшить объем, занимаемый аппаратурой, привело в 60-е годы к объединению различных устройств в "радиокомбайны". При этом, однако, ухудшилась их ремонтпригодность, а радиозаводам пришлось освоить выпуск футляров мебельного типа. Дальнейшее усложнение систем и стремление уменьшить их влияние на интерьер квартиры привело в 70-х годах к созданию радиокомплексов из блоков с унифицированными габаритными размерами и "нейтральным" приборным ис-

полнением. Создание комфортных условий коллективного и индивидуального приема видеозвуковой информации обуславливает необходимость использования систем бытовой аппаратуры, состоящих из коммутирующих устройств, наушников, устройств дистанционного управления, индивидуальных громкоговорителей, звуковых колонок и т. д.

Конструкции бытовых электронных средств в 80-е годы претерпели значительные изменения. Это связано с появлением новых видов аппаратуры, а также с улучшением характеристик традиционной аппаратуры. К новым видам бытовых ЭС следует отнести электронные игры, персональные компьютеры, видеомагнитофоны и видеокамеры, лазерные воспроизводящие звуко- и видеоустройства, цветные телевизоры с дистанционным управлением и стереофоническим звуком, двухкассетные магнитофоны и магнитола, усилители с эквалайзерами, магнитофоны для воспроизведения звуковой и видеoinформации, автомобильные магнитола и т. д. Эта аппаратура выполняется в виде отдельных блоков. Размеры блоков часто унифицированы, что позволяет их компоновать в виде стоек со встроенными объемами для хранения кассет, дисков и т. д. При цветовом оформлении преобладают нейтральные цвета, что позволяет учесть возможность их размещения в любом интерьере. Ввиду того что новые виды аппаратуры имеют большое количество органов управления и индикации, при разработке их конструкции в большей степени учитываются требования эргономики.

**При оформлении бытовых ЭС** требуется учитывать интересы предполагаемого потребителя: технические параметры (звуковые колонки, многодорожечная запись, регулировка качества звука, видео-запись и т. д.), технические и эстетические параметры ("престижное" оформление), удовлетворение от самого процесса общения с аппаратурой (наличие большого количества элементов управления и индикации, "приборное" оформление). Цветовое оформление должно учитывать интерьер. Чтобы аппаратура подходила под любой интерьер, иногда идут на "нейтральное" приборное оформление бытовой аппаратуры.

В настоящее время отработка внешнего оформления электронных средств осуществляется на всех этапах конструирования. На *стадии*

*эскизного проектирования* изучаются техническое задание, художественно-конструкторские аналоги и прототипы, каталоги, проспекты, стандарты и другая информация (в том числе, патентная). На *стадии технического проектирования* эскизный проект корректируется с учетом конкретных конструкторско-технологических требований. При этом окончательно выбирают форму изделия и его цветовое решение с учетом технологических возможностей производства. В результате получают полный комплект художественно-конструкторской документации, необходимый для разработки рабочего проекта. На *этапе разработки рабочей документации* и изготовления опытного образца дизайнер дает консультацию и осуществляет надзор за сохранением замысла технического художественно-конструкторского проекта, контролирует и визирует конструкторскую и технологическую документацию, оформляет заявку на промышленный образец.

**При эргономическом анализе** необходимо убедиться в том, что расположение приборов и органов управления обеспечивает удобное положение человека при работе, рабочая плоскость находится на удобной высоте с учетом рабочего положения и расстояния до глаз, органы управления размещены в пределах досягаемости с учетом положения тела оператора при работе; форма, размеры и материал органов управления соответствуют прилагаемому усилию, прилагаемые усилия допустимы с точки зрения физиологии, конструкция обеспечивает удобство обслуживания и ремонта ЭС (доступность, степень риска, освещенность и т. д.), для выполнения данной работы достаточна существующая освещенность, органы управления и индикации размещены на оптимальном расстоянии в поле зрения, деления шкал видны четко, индикаторы расположены достаточно близко от соответствующих органов управления, в однотипной аппаратуре органы управления расположены одинаково и правильно, по положению органов управления и индикации возможно быстро определить ситуацию (например включено/выключено), рука при перемещении органа управления не закрывает шкалу индикатора, режим работы оператора допускает правильное чередование работы и отдыха, а также динамических и статических видов нагрузки, существует соответствие между

перемещением органов управления и вызванными ими эффектами, органы управления и индикации размещены в последовательности, соответствующей порядку выполнения операций, физическая и психическая нагрузка при работе соответствует возможностям различных операторов (мужчин, женщин, молодых и пожилых работников).

**На этапе эстетического анализа** выясняется объемно-пространственная структура и определяется ведущий формообразующий принцип (симметричное, асимметричное, статическое, динамическое решение); уточняется композиционная иерархия целого, определяются акценты, главные и второстепенные элементы; определяется логика взаимопереходов и взаимосвязей отдельных объемов и сочленений; выявляется единство и подобие геометрического построения поверхностей элементов целого; оценивается динамика формы, направленности масс (объемов) и их соответствие функции изделия; оцениваются информативные свойства формы, с помощью которой человек информируется о функции изделия в целом и его отдельных частей; проверяются тектоничность основных формообразующих элементов и соответствие формы конструктивным особенностям применяемого материала и характеру его работы; определяется степень согласованности, соразмерности и соподчиненности элементов и целого; оценивается характер отношений отдельных элементов целого (контрастных, нюансных, тождественных связей в форме); проверяется пропорциональность композиции; уточняются наличие модуля и оптимальность его значения; оценивается соответствие пропорционального строя динамическим тенденциям формы изделия; проверяется ритмический строй изделия по горизонтали и вертикали; оценивается сложность ритмического построения и четкость восприятия ритма и соответствие ритма динамическим тенденциям формы; определяется масштаб изделия по отношению к предметам окружающей среды и к человеку, выявляются масштабные несоответствия и элементы-указатели масштаба; оцениваются поверхность изделия с точки зрения рисующих световых линий (бликов светового каркаса), гармоничность формы светового каркаса, фактура поверхностей и использованные декоративные свойства материала, самостоятельные

элементы (крепёжные детали, органы управления, устройства индикации и т. д.), их одностильность и взаимосогласованность, единство деталей и целого, цветовая композиция, единство геометрической формы и цвета, выделение цветом функционально важных элементов, стилевая направленность и наличие фирменного стиля.

Анализ слабых решений столь же полезен, сколь и анализ удачных. Ввиду того что при анализе необходимо учитывать специфику схемотехнических, конструкторских, эргономических и эстетических свойств конкретных образцов ЭС, его целесообразно выполнять на макете или опытном образце, изготовленном промышленными методами из серийно выпускаемых материалов. Это позволяет оценить соответствие художественно-конструкторского замысла по таким тонким свойствам, как фактура поверхности, цветовой колорит, тональность цвета, световой каркас, а также проверить окончательно эргономичность изделия (удобство пользования им).

При художественно-конструкторском оформлении электронных средств необходимо учитывать технологические ограничения на формо- и цветообразование, фактуру поверхности (матовая, шероховатая, блестящая, с "рисунком"), параметры применяемых материалов (цветовой тон, защитно-декоративные свойства, технологичность их использования). Художник-конструктор должен учитывать ограничения по формообразованию, накладываемые технологией (прессование пластмасс, литьевое или вакуумное формование и т. д.). Это должно найти отражение в конструкции ЭС (радиусы закругления, литейные уклоны, поднутрения, толщина стенок и т. д.). Особое внимание он должен обратить на соответствие параметров материалов паспортным данным, так как от этого зависят такие нюансные свойства, как тон и фактура поверхности, световой каркас. В ряде случаев художник-конструктор должен и может настоять на изменении компоновки изделия, использовании материалов или улучшенных технологических процессов. Это особенно важно, когда надо обеспечить конкурентоспособность и быстрый сбыт изделия. Работа художника-конструктора будет тем успешнее, чем с более раннего этапа разработки изделия он в нее включился.



## Контрольные вопросы

1. Как выглядит схема алгоритма художественного конструирования?
2. Какие показатели лежат в основе композиции?
3. Дайте понятие категории композиции.
4. Что такое средство композиции? Дайте понятие основных средств композиции.
5. Что относят к способам композиции?
6. Каким образом взаимосвязаны средства, способы, категории и критерии композиции?
7. В чем заключаются особенности оформления профессиональных ЭС?
8. Как обеспечить целостность панели управления?
9. В чем заключаются особенности оформления бытовых ЭС?

## 13. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИИ

### 13.1. Качество и возможность его оценки

Качество любого изделия – это совокупность свойств этого изделия, обуславливающая возможность его применения, удовлетворяющую определенным требованиям потребителя. Количество свойств, определяющих качество любого изделия, огромно. Учитывая, что качество закладывается в изделие в процессе его проектирования, то уже на этапе разработки конструкции необходимо оценивать ее качество.

Из-за большого числа противоречивых свойств, определяющих качество изделия, возникают сложности в оценке качества. Одним из наиболее распространенных методов оценки качества является метод сравнения действительно значения параметра качества с базовым значением. В качестве базового значения выбираются показатели качества аналога – существующей конструкции ЭС аналогичного назначе-

ния или конструкции с заданными по техническому заданию параметрами. Оценка качества конструкции по каждому сравниваемому показателю  $Q_i$  рассчитывается как относительная величина, основанная на сравнении определяющих параметров, данных  $D_i$  оцениваемой конструкции с их базовыми значениями  $B_i$  аналога с учетом коэффициентов влияния каждого параметра.

Разработанная конструкция электронных средств должна соответствовать энерго-информационным (функциональным) параметрам согласно своему назначению, удовлетворять общим конструктивным, эксплуатационным и экономическим требованиям, обеспечивать эффективность производства. Это значит, конструкция выполнена согласно заданной электрической принципиальной схеме с учетом электрических, тепловых, электромагнитных, механических связей элементов и воздействий в заданных условиях эксплуатации на объекте назначения и обеспечивает:

- минимизацию габаритных размеров и массы конструкции, высокий уровень микроминиатюризации;
- заданные характеристики надежности и защищенность конструкции от климатических и механических воздействий;
- высокую преемственность (уровень унификации) и технологичность;
- безопасность и удобство эксплуатации;
- эстетику оформления, совершенство исполнения;
- технологичность, экономичность производства;
- патентную чистоту и патентную защищенность конструкции.

Следовательно, комплексный показатель качества  $Q$  конструкции зависит от совместного влияния многих обобщенных показателей:

$Q_i$  отдельных групп;

$Q_1$  – показателя группы функционального, эксплуатационного конструктивного назначения изделия;

$Q_2$  – показателя группы надежности;

$Q_3$  – показателя группы зависимости от взаимодействий;

$Q_4$  – показателя группы безопасности, эргономики;

$Q_5$  – показателя группы эстетики;

$Q_6$  – показателя группы технологичности, экономичности производства;

$Q_7$  – показателя патентно-правовой группы.

При оценке качества в зависимости от назначения конструкции электронных средств и специфики ее эксплуатации обобщенные показатели качества учитываются с соответствующими коэффициентами веса по известной методике [3(13.4)]

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i M_i,$$

где  $M_i$  – коэффициент веса (влияния) каждой группы показателей, принимает значения

$0 < M < 1$ , так чтобы  $\sum_{i=1}^n M_i = 1$ ;  $i = 1, 2, \dots, 7$  – группы обобщен-

ных показателей качества.

Каждый обобщенный показатель качества  $Q_i$  группы параметров определяется через частные показатели  $q_j$ , определяющие данную группу:

$$Q_i = \sum_{j=1}^k q_j M_j,$$

где  $q_j$  –  $j$ -й частный показатель конструкции в  $i$ -й группе параметров,  $k$  – число частных показателей  $b$  группе,  $m_j$  – коэффициент веса частного показателя в группе, принимает значения

$$0 \leq m_j < 1, \sum_{j=1}^k m_j = 1.$$

Показатели качества определяются в относительных единицах сравнением параметров базовой конструкции  $B_i$ ; (аналога) и данных разработанных конструкций  $D_i$ .

При этом разработанная конструкция тем лучше, чем больше ее относительный показатель качества, поэтому рассчитывают

$$q_j = \frac{B_j}{D_j},$$

когда уменьшение абсолютных значений данных  $D_i$  (например объем, масса) определяет улучшение конструкции, и

$$q_j = \frac{D_j}{B_j},$$

когда увеличение данных  $D_i$  (например среднее время наработки на отказ) соответствует улучшению качества конструкции.

Из сравниваемых конструкций ЭС лучшим качеством обладает та, которая имеет большой комплексный показатель качества с учетом весомости  $M_i$  и  $m_j$  обобщенных и частных показателей. При определении коэффициентов весомости необходимо следовать следующим правилам:

1. Коэффициенты весомости сравниваемого качества данной и базовой конструкций должны быть одинаковы.

2. Коэффициенты весомости наиболее важного по условиям назначения, производства и эксплуатации параметра изделия имеют наибольшее значение.

3. Показатели одинаковой важности имеют равные коэффициенты весомости.

4. Каждая сумма коэффициентов весомости  $m_j$  частных показателей в группе и сумма  $M_i$  обобщенных показателей должны равняться единице.

Коэффициенты весомости определяются специалистами данного вида ЭС экспертным методом.

Показатели качества, которые нельзя оценить какой-либо физической величиной (например ремонтпригодность), оценивают в баллах методом экспертных оценок.

При этом устанавливается трехбалльная шкала качественных оценок, когда принимают 3 оценки рассматриваемого качества:

1 балл – "удовлетворительно",

2 балла – "хорошо",

3 балла – "отлично".

Выбранная шкала оценок обеспечивает значительную разницу между оценками "удовлетворительно" и "хорошо" и между "хорошо" и "отлично" (50 %), что психологически обоснованно и проверено.

Расчет показателей качества конструкции ЭС выполняют при заполнении карт технического уровня и качества (ГОСТ 2.116-71), пример заполнения дан в табл.13.1.

Таблица 13.1 Пример заполнения карты  
технического уровня и качества

| №<br>п/п | Наименование<br>показателей                          | Численное значение показателя                                   |                  |       |       |           |
|----------|--|---|------------------|-------|-------|-----------|
|          |  | Базового<br>$B_i$   | Данного<br>$D_i$ | $q_i$ | $m_i$ | $q_i m_i$ |
| 1        | <b>Группа назначения</b>                             |   |                  |       |       |           |
| 1.1      | Классификационные                                    | Совпадают с базовыми  |                  |       |       |           |
| 1.2      | Эксплуатационные,<br>конструктивные и миниатюризации | Совпадают с базовыми  |                  |       |       |           |
| 1.3      | Объем, дм <sup>3</sup>                               | 0,3   | 0,2              | 1,5   | 0,3   | 0,45      |
| 1.4      | Масса, кг  | 1,4   | 1                | 1,4   | 0,3   | 0,42      |
| 1.5      | Потребляемая мощность, Вт                            | 1,1   | 1                | 1,1   | 0,2   | 0,22      |
| 1.6      | Уровень миниатюризации                               | 200   | 220              | 1,1   | 0,2   | 0,22      |
| 1.7      | Обобщенный показатель группы назначения              | $Q_1 = \sum_{i=1}^6 q_i m_i = 1,31; M_1 = 0,3; Q_1 M_1 = 0,393$ |                  |       |       |           |
| 2        | <b>Группа надежности</b>                             |   |                  |       |       |           |
| 2.1      | Среднее время наработки на отказ, ч                  | 1000  | 1500             | 1,5   | 0,4   | 0,6       |
| 2.2      | Долговечность (средний срок службы), лет             | 6   | 6                | 1     | 0,3   | 0,3       |
| 2.3      | Сохраняемость, лет                                   | 10  | 10               | 1     | 0,3   | 0,3       |
| 2.4      | Обобщенный показатель группы надежности              | $Q_2 = \sum_{i=1}^3 q_i m_i = 1,2; M_2 = 0,2; Q_2 M_2 = 0,24$   |                  |       |       |           |

Продолжение табл. 13.1

| № п/п    | Наименование показателей                                 | Численное значение показателя                                   |                  |       |       |           |
|----------|--|---|------------------|-------|-------|-----------|
|          |  | Базового<br>$B_i$   | Данного<br>$D_i$ | $q_i$ | $m_i$ | $q_i m_i$ |
| <b>3</b> | <b>Группа защищенности от возмущающих воздействий</b>    |   |                  |       |       |           |
| 3.1      | Минимальная собственная частота колебаний плат ячеек, Гц | 120   | 260              | 2,17  | 0,1   | 0,217     |
| 3.2      | Максимальная амплитуда колебаний элементов ячеек А, мм   | 1,5   | 1                | 1,5   | 0,2   | 0,3       |
| 3.3      | Максимальная температура перегрева нагретой зоны, °С     | 30  | 20               | 1,5   | 0,3   | 0,45      |
| 3.4      | Ремонтопригодность конструкции, баллы                    | 2,1   | 2,55             | 1,21  | 0,4   | 0,48      |
| 3.5      | Обобщенный показатель группы защищенности                | $Q_3 = \sum_{i=1}^4 q_i m_i = 1,45; M_3 = 0,1; Q_3 M_3 = 0,145$ |                  |       |       |           |
| <b>4</b> | <b>Группа показателей безопасности, эргономики</b>       |   |                  |       |       |           |
| 4.1      | Безопасность, баллы                                      | 3   | 3                | 1,0   | 0,3   | 0,3       |
| 4.2      | Гигиенические, баллы                                     | 3   | 3                | 1,0   | 0,1   | 0,1       |
| 4.3      | Антропометрические, баллы                                | 2   | 2,2              | 1,1   | 0,5   | 0,55      |
| 4.4      | Психофизиологические, баллы                              | 3   | 3                | 1,0   | 0,1   | 0,1       |
|          | Обобщенный показатель группы безопасности и эргономики   | $Q_4 = \sum_{i=1}^4 q_i m_i = 1,05; M_4 = 0,1; Q_4 M_4 = 0,105$ |                  |       |       |           |
| <b>5</b> | <b>Группа эстетики</b>                                   |   |                  |       |       |           |
| 5.1      | Выразительность, баллы                                   | 2   | 3                | 1,5   | 0,2   | 0,3       |
| 5.2      | Рациональность формы, баллы                              | 2   | 2,9              | 1,45  | 0,4   | 0,58      |
| 5.3      | Целостность композиции, баллы                            | 2   | 2,8              | 1,4   | 0,1   | 0,14      |
| 5.4      | Совершенство производственного исполнения, баллы         | 2   | 2,8              | 1,4   | 0,3   | 0,42      |
| 5.5      | Обобщенный показатель группы эстетики                    | $Q_5 = \sum_{i=1}^4 q_i m_i = 1,44; M_5 = 0,1; Q_5 M_5 = 0,144$ |                  |       |       |           |

Окончание табл. 13.1

| №<br>п/п | Наименование<br>показателей                                 | Численное значение показателя                                   |                  |       |       |           |
|----------|---|---|------------------|-------|-------|-----------|
|          |   | Базового<br>$B_i$   | Данного<br>$D_i$ | $q_i$ | $m_i$ | $q_i m_i$ |
| 6        | <b>Группы экономичности и технологичности производства</b>  |   |                  |       |       |           |
| 6.1      | Технологичность, тыс.<br>руб.                               | 0,5   | 0,7              | 1,4   | 0,6   | 0,84      |
| 6.2      | Себестоимость, тыс.<br>руб.                                 | 1   | 1,2              | 0,83  | 0,4   | 0,33      |
| 6.3      | Обобщенный показатель группы технологичности, экономичности | $Q_6 = \sum_{i=1}^2 q_i m_i = 1,17; M_6 = 0,1; Q_6 M_6 = 0,117$ |                  |       |       |           |
| 7.       | <b>Группа патентно-правовая</b>                             |   |                  |       |       |           |
| 7.1      | Патентная защищенность                                      | 0,10  | 0,13             | 1,3   | 1     | 1,3       |
| 7.2      | Патентная чистота   | 0   | 0                | 0     | 0     | 0         |
| 7.3      | Обобщенный показатель патентно-правовой группы              | $Q_7 = \sum_{i=1}^2 q_i m_i = 1,3; M_7 = 0,1; Q_7 M_7 = 0,13$   |                  |       |       |           |
| 7.4      | Комплексный показатель качества конструкции                 | $Q = \sum_{j=1}^7 Q_j M_j = 1,274$                              |                  |       |       |           |

### 13.2. Расчет и оценка показателей качества электронных средств

Для того чтобы рассчитать комплексный показатель качества разработанной конструкции, необходимо подобрать аналог, выбрать базовое изделие, номенклатуру показателей качества конструкции и заполнить карты технологического уровня качества. В качестве аналогов принимают реально существующие конструкции отечественной или зарубежной разработки того же класса, обладающие сходностью назначения. Из существующих аналогов для оценки качества разработанной конструкции выбирают базовое изделие, которое имеет лучшие показатели на данный период, и их технологическая реализуемость подтверждена реальным существованием базового изделия.

При разработке принципиально нового класса изделий бывают случаи, когда нет должных аналогов. Тогда за базовые показатели принимают заданные и технически реализуемые перспективные параметры. Выбор номенклатуры показателей качества конструкции необходимо ограничивать минимальным их количеством, обеспечивающим возможность сравнения по существенно влияющим для данного класса изделий параметрам, весовые коэффициенты должны быть выбраны с учетом назначения, условий эксплуатации и производства применительно к конкретному случаю. Предпочтительно выбирать показатели, характеризующие простые свойства, которые оцениваются инженерным расчетом конструкции, условий ее эксплуатации и производства.

Комплексные показатели сложных свойств, которые оценивают в баллах методами экспертных оценок, накапливают субъективизм оценки и поэтому их количество следует ограничивать важными для разработанного изделия или отличающимися от базовых данными.

Обобщенные показатели качества  $Q_i$  рассчитываются через  $q_j$  частные показатели в группе оцениваемых параметров.

#### **I группа – показатели назначения**

Определяются классификационные, эксплуатационные и конструктивные параметры. К классификационным параметрам относят энергоинформационные параметры, определяющие функциональное назначение изделия, например: для передатчика – мощность, приемника – чувствительность. К эксплуатационным параметрам относят параметры, характеризующие условия и специфику эксплуатации, например: характеристики климатических и механических воздействий, особенности характеристик объекта (носимая, возимая и т.д.).

Конструктивные показатели характеризуют основные параметры конструкции: объем, массу, мощность потребления, коэффициент деинтеграции, уровень миниатюризации.

Объем  $V$  зависит от элементной базы, рациональности компоновки, конструктивных потерь из-за монтажа, несущих конструкций, теплоотводящих и прочих элементов защиты. Он определяется через габаритные размеры конструкции.



Масса конструкции  $M$  зависит от объема и удельной плотности элементов и определяется как суммарная масса всех элементов (несущих, электрорадиоэлементов, электрических соединений и защиты).

Мощность потребления  $P_0$  зависит от полезной мощности  $P$  и коэффициента полезного действия устройства  $\eta$  и может рассчитываться как суммарная мощность потребления всех электрорадиоэлементов или через мощность на выходе

$$P_0 = \frac{P}{\eta}.$$

Уровень миниатюризации характеризует эффективность использования объема конструкции электрорадиоэлементами за счет применения микроэлектронной элементной базы. Расчет уровня миниатюризации основан на вычислении двух коэффициентов:

- коэффициента применяемости микроэлементов новой техники, к которым относятся интегральные схемы, микропроцессорные комплекты, микросборки гибридные интегральные модули, устройства функциональной электроники;

- коэффициента плотности компоновки.

Коэффициент применяемости микроэлементов новой техники  $K_{\Pi}$  определяется как отношение числа элементов в эквивалентных схемах микроэлементов новой техники к общему числу элементов изделия

$$K_{\Pi} = \frac{N_{\text{э}}}{N_{\text{д}}},$$

где  $N_{\text{э}} = \sum_{i=1}^L n_i N_i$  – общее число элементов в эквивалентных схемах микроэлементов новой техники;

$N_{\text{д}}$  – общее число дискретных корпусных ЭРЭ в изделии;

$n_i$  – число элементов в эквивалентной схеме  $i$ -го микроэлемента новой техники;

$N_i$  – число  $i$ -х микроэлементов новой техники в изделии;

$L$  – количество микроэлементов новой техники.

Коэффициент плотности компоновки  $\gamma$  характеризует количество ЭРЭ в единице объема конструкции и определяется как отношение

$$\gamma = \frac{N_{\text{э}} + N_{\text{д}}}{V}.$$

Показатель уровня миниатюризации  $K_{\text{м}}$  оценивает количество элементов всех эквивалентных схем микроэлементов новой техники в единице объема конструкции и определяется по формуле

$$K_{\text{м}} = \frac{N_{\text{э}}}{V} = K_{\text{п}}\gamma.$$

## **II группа – показатели надежности**

Надежность как сложное комплексное свойство характеризуется тремя составляющими: безотказностью, долговечностью, сохраняемостью.

Показателем безотказности служит вероятность безотказной работы изделия на заданное время работы или среднее время наработки до отказа, т. е. суммарная продолжительность работы изделия во включенном состоянии до первого отказа.

Они рассчитываются по существующей статистической характеристике  $\lambda_i$  интенсивности отказов элементов с учетом коэффициентов нагрузки элементов и коэффициентов условий эксплуатации по температуре, влажности, механическим воздействиям.

Если таких характеристик для некоторых микроэлементов новой техники (например микросборок) к начальному периоду применения нет, то их рассчитывают через моделирование внезапных отказов отдельных групп элементов ненадежности (внутренние и внешние контакты микроэлементов новой техники, полупроводниковых переходов и т. п.).

Показателем долговечности может быть ресурс и срок службы изделия. Ресурсом называют наработку изделия в часах от начала эксплуатации до наступления предельного состояния, когда дальнейшая эксплуатация опасна или экономически нецелесообразна, т. е. суммарное время работы изделия до предельного состояния.

Сроком службы называют продолжительность эксплуатации изделия от ее начала до наступления предельного состояния, т. е. непрерывное время, включающее суммарное время работы и простоя изделия.

Ресурс устанавливают обычно не меньше 10 – 20 тыс.ч., срок службы – от 6 до 12 лет.

Основным показателем сохраняемости служит срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и транспортировки изделия в заданных условиях, в течение и по прошествии которого сохраняются в установленных пределах показатели назначения.

### **III группа – показатели защищенности конструкции от возмущающих воздействий**

Показатели оценивают защищенность конструкции от вибраций и ударов при эксплуатации и транспортировке, качество охлаждения и обеспечение допустимого теплового режима, приспособленность конструкции к режиму – ремонтпригодность.

Защищенность от вибрации оценивается отсутствием возможных механических ударов, резонансов элементов конструкции и допустимостью амплитуд колебаний. Для этого рассчитываются собственные частоты  $f_0$  наиболее чувствительных к механическим воздействиям элементов конструкции, которые должны быть выше частот возмущающих вибраций. Максимальная амплитуда колебания или смещения  $A$  рассчитывается при ударах и вибрациях на платах или других несущих элементах, должна быть меньше допустимой для электрорадиоэлемента величины перемещения  $A_{\text{доп}}$  или ускорения  $\omega^2 A \leq a_{\text{доп}}$ .

Теплозащищенность конструкции оценивается эффективностью системы теплоотвода и теплоохлаждения, расчетом максимальной температуры перегрева  $\Delta t_z$  в нагретой зоне при заданной температуре эксплуатации. Ремонтпригодность оценивается комплексным показателем, который зависит от конструктивных предпосылок в изделии по обнаружению неисправностей, допустимости к ремонтируемым и контролируемым элементам, возможности замены вышедших из строя элементов. Показатели ремонтпригодности рассчитываются в баллах по отдельным  $D_i$  компонентам с учетом весовых коэффициен-

тов  $m_i$  методом экспертных оценок по рассмотренной трехбалльной системе. Пример расчета комплексного показателя ремонтпригодности блока представлен в табл.13.2.

Таблица 13.2 Пример оценки показателей ремонтпригодности

| № п/п | Компоненты ремонтпригодности                                      | Оценка $D_i$ , баллы              | Весовой коэффициент $m_i$ | $D_i \cdot m_i$ |
|-------|---|-----------------------------------|---------------------------|-----------------|
| 1     | Наличие элементов контроля  | 1                                 | 0,1                       | 0,1             |
| 2     | Ограниченность потребности в контрольно-проверочной аппаратуре    | 2                                 | 0,05                      | 0,1             |
| 3     | Наличие маркировки, надписей ЭРЭ                                  | 3                                 | 0,15                      | 0,45            |
| 4     | Разъемность, подвижность элементов конструкции, монтажа           | 3                                 | 0,2                       | 0,6             |
| 5     | Свобода манипулирования и зрительный контроль работы рук          | 2                                 | 0,1                       | 0,2             |
| 6     | Удобство позы при ремонте   | 3                                 | 0,1                       | 0,3             |
| 7     | Заменяемость элементов по электрическим и механическим параметрам | 2                                 | 0,1                       | 0,2             |
| 8     | Наличие ключевых устройств для элементов замены                   | 3                                 | 0,15                      | 0,45            |
| 9     | Ограниченность усилий при замене                                  | 3                                 | 0,05                      | 0,15            |
| 10    | Показатель ремонтпригодности                                      | $D = \sum_{i=1}^9 D_i m_i = 2,55$ |                           |                 |

#### **IV группа – показатели безопасности и эргономики**

Показатели безопасности эксплуатации оцениваются в баллах по комплексу мер, предусмотренных в конструкции для обеспечения безопасности оператора, обслуживающего изделие. Анализ и сравнение с аналогом проводят по критериям:

- наличие напряжений, опасных для человека в заданных условиях эксплуатации, и эффективность средств защиты;
- наличие высоких напряжений и средств блокировки в конструкциях на отключение при ремонте, средств включения сигнализации и их надежность и эффективность;

- электрическая прочность изоляции и запас прочности с учетом ее старения, загрязнения при эксплуатации;

- отсутствие пожароопасных материалов в конструкции и наличие средств защиты при нагреве.

Гигиенические показатели удобства и безопасности эксплуатации оценивают в баллах в сравнении с аналогом по следующим параметрам:

- освещенность органов управления, контроля и отображения информации в экстремальных условиях эксплуатации;

- электромагнитные излучения и эффективность средств защиты;

- наличие шума, вибрации при эксплуатации и эффективность средств защиты;

- наличие источников интенсивного тепловыделения и средств защиты от него для оператора.

Эргономические показатели оценки качества конструкции определяют соответствие размеров, расположения элементов конструкции размерам и физическим особенностям человека (антропометрические показатели) и соответствие процесса управления, контроля, отображения информации возможностям органов восприятия информации и физическим возможностям человека (психофизиологические показатели).

Антропометрические показатели оценивают в баллах по следующим критериям сравнения:

- удобство рабочей позы оператора;

- легкодоступность органов управления, контроля и отображения информации;

- совместимость формы и расположения органов управления конструкции с рабочим положением и формой оператора.

Психофизиологические показатели оценивают в баллах по результатам сравнения следующих параметров:

- оптимальность угла обзора оператора при работе;

- ограниченность органов управления и отображения информации;

- быстроедействие управления изделием и восприятия информации;

- простота и надежность считывания информации в экстремальных условиях эксплуатации (ограниченная освещенность, удары, вибрации и т.д.);

- наличие и соответствие содержания и формы надписей, оцифровок панелей и шкал рекомендуемым методам изготовления, шрифтам, символам, размерам и положениям;
- ограниченность физических усилий оператора при управлении и эксплуатации изделия;
- защищенность конструкции от повреждения при направленной последовательности операций управления оператором;
- простота операций процесса управления и обработки информации.

### **V группа – показатели эстетики**

Показатели эстетики оценивают художественное оформление конструкции во взаимосвязи с целостностью композиции и совершенством производственного исполнения в баллах. Выразительность формы оценивают по трем составляющим:

- лаконизм и компактность формы;
- оригинальность композиционного и цветного решения;
- фирменный стиль и марка.

Рациональность форм оценивают по двум составляющим:

- функциональная логика взаимодействия частей;
- эргономическая обусловленность формы.

Целостность композиции, характеризующая гармоническое единство частей целого, оценивается четырьмя составляющими:

- композиционной логикой;
- пластичностью (упорядоченность) очертаний и взаимопереходов плоскостей;
- соподчинением графических элементов общей композиции;
- комфортом и декоративностью (взаимосвязь световых сочетаний с декоративными свойствами материала).

Совершенство производственного исполнения оценивается по составляющим:

- чистота исполнения сопряжений и скруглений;
- четкость исполнения знаков, тщательность покрытий и отделки;
- устойчивость к повреждению поверхности в условиях эксплуатации.

## **VI группа – показатели технологичности, экономичности производства**

Показатели технологичности и экономичности производства определяют комплексную оценку по конструкторским и технологическим показателям, которые характеризуют предпосылки повышения эффективности производства, снижение времени, трудоемкости разработки и изготовления, материалоемкости конструкции. Они безразмерны и рассчитываются через показатели (коэффициенты использования микросхем и микросборок, повторяемость, применяемость ЭРЭ, трудоемкость изготовления, материалоемкость и т.д.) по известной методике [21(13.5)]. При этом показатели ранжируются и получают весовые коэффициенты в зависимости от функциональных особенностей изделия.

Общая себестоимость включает в себя стоимость материалов, заработную плату рабочих и косвенные, в том числе накладные расходы.

## **VII группа – патентно-правовые показатели**

Патентно-правовые показатели позволяют оценить конкурентоспособность конструкции ЭС и ее новизну. Патентно-правовой уровень конструкции оценивается двумя безразмерными показателями: показателем патентной защиты и показателем патентной чистоты.

Показатель патентной защиты характеризуется в относительных единицах числом и весомостью новых отечественных изобретений, реализованных в данном изделии, в том числе и созданных при его разработке, и рассчитывается по формуле

$$\Pi_{пз} = \left( \sum_{i=1}^S K_i N_i' + m \sum_{i=1}^S K_i N_i'' \right) / N,$$

где  $S$  – число групп значимости;

$K_i$  – коэффициент весомости составных частей ( $0 < K_i < 1$  в зависимости от ранжирования значимости составной части);

$N'$  и  $N''$  – число составных частей изделия, защищенных авторскими свидетельствами и патентами в России ( $N'$ ) и за рубежом (по группам значимости);

$N$  – общее число составных частей в изделии;

$m$  – коэффициент весомости патентов, прямо пропорционально зависящий от числа строк, в которых получены патенты, и от важности этих строк для эксперта изделия.

Показатель патентной чистоты характеризует возможность реализации изделия внутри страны и за рубежом, зависит от числа использованных зарубежных патентов и вычисляется по формуле

$$\Pi_{\text{пч}} = (N - \sum_{i=1}^s K_i N_i) / N,$$

где  $N_i$  – число составных частей изделия, подпадающих под действие патентов в данной стране (по группам значимости).

### **Контрольные вопросы**

1. Как определяется комплексный показатель качества конструкции?
2. Что представляют собой частные и обобщенные показатели групп?
3. В чем заключается сущность метода экспериментальных оценок для определения некоторых частных показателей и весовых коэффициентов?
4. В чем противоречивость требований к конструкции? Примеры противоречий.
5. В чем компромиссность конструкторских решений при многокритериальном выборе лучшего варианта? Примеры решений.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Методология проектирования электронных средств продолжает непрерывно совершенствоваться, и пути ее развития связаны, во-первых, с внедрением ЭС во все сферы человеческой деятельности, во-вторых, с ростом степени интеграции применяемой элементной базы и прежде всего микроэлектронной, в-третьих, расширением доли



цифровой аппаратуры; в-четвертых, исчезновением четких границ между системотехническим, схемотехническим, конструкторским и технологическим проектированием ЭС. Эти тенденции не новы – они характерны для развития науки и техники последние четверть века. Современные достижения в области нанотехнологий только усиливают эти тенденции. Степень интеграции применяемой в ЭС элементной базы будет сохранять в последующие годы устойчивую тенденцию к увеличению.

Использование электронных средств в существующих типах конструкций машин, приборов и оборудования ставит перед конструкторами задачу конструктивной, электромагнитной, тепловой и др. совместимости. Указанная задача может быть решена двумя путями. Первый путь предполагает адаптацию конструкции ЭС под управляемые этими средствами объекты (например автомобильные, телевизионные, радиоприемные и др. микроконтроллеры). Вторым путем заключается в адаптации управляемых электронными средствами объектов под унифицированную и стандартизованную конструкцию ЭС. На практике используются оба пути, хотя первый применяется много чаще, а это требует постоянного поиска новых решений проектировщиками электронных средств.

Рост степени интеграции микросхем, увеличение их функциональной сложности и повышение быстродействия неизбежно приводит к увеличению удельной мощности тепловыделения, электромагнитному взаимовлиянию, плотности компоновки ЭС в целом. Это ставит перед проектировщиками ЭС качественно новые задачи по обеспечению надежной работы ЭС и стоящих на них систем. Так, например, проблему отвода тепла от процессоров уже не решить установкой индивидуального вентилятора, а в некоторых случаях и жидкостной системой охлаждения тепловыделяющих элементов. Необходимы другие, более эффективные решения, например, применение миникриогенных устройств. С повышением степени интеграции микросхем возрастает сложность «проблемы выводов», решение которой невозможно без совместной работы конструкторов и технологов. Можно привести еще большее число проблем, решение которых потребует в ближайшие годы усилий разработчиков электронных средств, в том числе конструкторов.

## Библиографический список

1. Асланянц, В. Р. Принципы формирования базы знаний конструктора электронных средств / В. Р. Асланянц, Л. Н. Панков // Электроника, информатика и управление : Сб. науч. тр., ВлГУ / Вып. 1. – Владимир, 2000. – С. 10 – 15. – ISBN 5- 89368-183-5.
2. Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб : Питер, 2001 – 384 с. – ISBN 5-272-00071-4.
3. Гель, П. П. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры : учеб. для вузов / П. П. Гелль, Н. К. Иванов-Есипович. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 536 с.
4. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М. : Изд-во стандартов, 1969. – 50 с.
5. ГОСТ 16019–2001. Аппаратура сухопутной подвижной радиосвязи. Требования по устойчивости к воздействию механических и климатических факторов и методы испытания. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 5 с.
6. ГОСТ 18831-73. ЕСТПП. Технологичность конструкций изделий. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 5 с.
7. ГОСТ 9.032-74. ЕСЗКС. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения. В 2 ч. Ч. 2. Покрытия лакокрасочные // Защита от коррозии. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – С. 18 – 39. – ISBN 5-7050-0073-1; ISBN 5 -7050-0129-0.
8. ГОСТ 9.104-79. ЕСЗКС. Покрытия лакокрасочные. Группы условий эксплуатации: В 2 ч. Ч. 2. Покрытия лакокрасочные // Защита от коррозии. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – С. 15 – 17. – ISBN 5-7050-0073-1; ISBN 5 -7050-0129-0.
9. ГОСТ 9.303-84. ЕСЗКС. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору и обозначению: В 2 ч. Ч. 1. Покрытия металлические и неметаллические неорганические // Защита от коррозии. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – С. 35 – 100. – ISBN 5-7050-0072-3.
10. Дульнев, Г. Н. Тепло и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г. Н. Дульнев. – М. : Высш. шк., 1984. – 247 с.

11. Ильинский, В. С. Защита РЭА от динамических воздействий / В. С. Ильинский. – М. : Радио и связь, 1982. – 296 с.

12. Каленкович, Н. И. Механические воздействия и защита радиоэлектронных средств : учеб. пособие для вузов по спец. «Конструирование и технология радиоэлектронных средств» и «Конструирование и технология электронных вычислительных средств» / Н. И. Каленкович, Е. П. Фастовец, Ю. В. Шамгин. – Минск : Вышэйш. шк., 1989. – 244 с.

13. Кечиев, Л. Н. Основы проектирования РЭС : курс лекций: Электронный документ (<http://www.kechiev.distudy.ru>). Проверено 10.01.2007.

14. Князев, А. Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечиев, Б. В. Петров. – М. : Радио и связь, 1989. – 224 с.

15. Алексеев, Г. В. Конструирование и расчет больших гибридных интегральных схем, микросборок и аппаратуры на их основе : учеб. пособие для вузов / Г. В. Алексеев [и др.] ; под ред. В. Ф. Высоцкого. – М. : Радио и связь, 1984. – 216 с.

16. Билибин, К. И. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учеб. для вузов / К. И. Билибин [и др.] ; под общ. ред. В. А. Шахнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 528 с. – ISBN 5-7038-1765-X.

17. Куземин, А. Я. Конструирование и микроминиатюризация электронно-вычислительной аппаратуры : учеб. пособие для вузов / А. Я. Куземин. – М. : Радио и связь, 1985. – 278 с.

18. Ненашев, А. П. Конструирование радиоэлектронных средств : учеб. для вузов / А. П. Ненашев. – М. : Высш. шк., 1990. – 432 с.

19. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры / под ред. В.Ф. Высоцкого. – М. : Сов. радио, 1978. – 351 с.

20. ОСТ 107.9.3001-87. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору. – 1987. – 104 с.

21. Павловский, В. В. Проектирование технологических процессов изготовления РЭА : пособие по курсовому проектированию / В. В. Павловский, В. И. Васильев, М. Н. Гутман. – М. : Радио и связь, 1982. – 169 с.

22. Панков, Л. Н. Оценка компоновочных характеристик блоков РЭА по допустимой температуре нагретой зоны / Л. Н. Панков, В. Р. Асланянц. – Владимир, 1988. – 13 с. Деп. в ИНФОРМСВЯЗЬ. 18.07.88. №1370-Св88.

23. Панков, Л. Н. Оценка параметров и синтез конструкции блоков микроэлектронной аппаратуры / сост. Л. Н. Панков. – Владимир : Владим. политехн. ин-т, 1990. – 31 с.
24. Панков, Л. Н. Конструирование ячеек радиоэлектронной аппаратуры : метод. указания к лаб. работам / сост.: Л. Н. Панков, Т. Н. Фролова. – Владимир : Владим. политехн. ин-т, 1993. – 40 с.
25. Панков, Л. Н. Конструкторская разработка ячеек и блоков микроэлектронной аппаратуры : метод. указания к лаб. работам по конструированию и микроминиатюризации РЭА / сост.: Л. Н. Панков, Т. Н. Фролова. – Владимир : Владим. политехн. ин-т, 1984. – 44 с.
26. Панков, Л. Н. Проектирование радиоэлектронных средств : метод. указания к курсовому проектированию / сост.: Л. Н. Панков. – Владимир : Владим. гос. ун-т, 1999. – 16 с.
27. Полонский, Н. В. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры / Н. В. Полонский. – М. : Сов. радио, 1979. – 216 с.
28. Преснухин, Л. Н. Конструирование электронных вычислительных машин и систем : учеб. для вузов по спец. «ЭВМ» и «Конструирование и производство ЭВМ» / Л. Н. Преснухин, В. А. Шахнов. – М.: Высш. шк., 1986. – 512 с.
29. Парфенов, Е.М. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов. / Е. М. Парфенов, Э. Н. Камышная, В. П. Усачев. – М. : Радио и связь, 1989. – 272 с.
30. Романычева, Э. Т. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА : справ. пособие / Э. Т. Романычева [и др.]. – М. : Радио и связь, 1984. – 256 с.
31. РД 107.9.4002-96. Покрывтия лакокрасочные. Номенклатура, свойства, области применения. – 1988. – 103 с.
32. Талицкий, Е. Н. Алгоритм проектирования виброзащиты электронных средств / Е. Н. Талицкий // Проектирование и технология электронных средств. – Владимир, 2001. – № 1. – С. 3 – 5.
33. Талицкий, Е. Н. Механические воздействия и защита электронной аппаратуры : учеб. пособие // Е. Н. Талицкий ; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2001. – 256 с. – ISBN 5-89368-232-7.
34. Грачев, А. Г. Конструирование электронной аппаратуры на основе поверхностного монтажа компонентов / А. Г. Грачев, А. А. Мельник, Л. И. Панов. – М. : Пресс, 2006. – 384 с. – ISBN 5-477-00358-8.

Учебное издание

ПАНКОВ Лев Николаевич  
АСЛАНЯНЦ Виктор Рубенович  
ДОЛГОВ Геннадий Филиппович и др.

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ»

Подписано в печать 11.09.07.  
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 15,11. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.